



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Softwarové ústředny ve vestavěných systémech

Softswitches in embedded systems

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Síť elektronických komunikací

Vedoucí práce: Ing. Bezpalec Pavel Ph.D.

Bc. Jaroslav Tomšů

Praha, Květen 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jaroslav Tomšů**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Softwarové ústředny ve vestavěných systémech**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte přehled vestavěných (embedded) systémů dostupných na trhu a diskutujte jejich možnosti řízení telefonních hovorů. Navrhněte výkonnostní testovací scénáře. U vybraných modelů proveďte praktické testy a diskutujte naměřené výsledky.

Seznam odborné literatury:

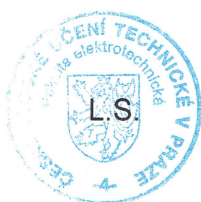
[1] Wilson, R. W.: *Embedded Systems and Computer Architecture*. 1st edition, Newnes, January 2002. ISBN: 978-0-750-65064-9.

[2] *iPerf - The Network Bandwidth Measurement Tool*. Dostupné na <http://iperf.fr> [on-line]

Vedoucí: Ing. Pavel Bezpalec, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

prof. Ing. Boris Simák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 21. 12. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Softwarové ústředny ve vestavných systémech vypracoval samostatně s přispěním vedoucího práce a použil jsem pouze literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 27.05.2016

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Bezpalcovi Ph.D. za poskytnutí materiálů, cenné připomínky a odborné rady při tvorbě práce. Zároveň bych velmi rád poděkoval společnosti UPC Česká republika s.r.o. za zapůjčení přístroje Grandstream UCM 6102 pro účely testování v této diplomové práci.

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou nově vznikajících vestavěných systémů a jejich výkonností s ohledem na použití v konkrétní aplikaci jako softwarové ústředny. Teoretická část práce, vymezující základní pojmy diplomové práce, se zaměří na přehled aktuálně dostupných systémů na trhu a jejich využitelnost v rámci malých pobočkových ústředen. Rozebrána je také problematika volání skrze IP síť a využívané protokoly pro potřeby přenosu signalizace a hlasu. Praktická část práce spočívá v návržení komplexního testování vestavěných systémů s ústřednou, zjišťující maximální možné provozní zatížení jednotlivých vestavěných systémů, a to za použití testovacích softwarů SIPP, SIP Tester a iPerf. Závěr práce je věnován výslednému shrnutí získaných výsledků a následnému zhodnocení nasazení těchto systémů v praxi.

Klíčová slova

VoIP, SIP, RTP, Asterisk, SIPP, iPerf, vestavěný systém, Raspberry Pi, Orange Pi, Banana Pi

Summary

This thesis deals with emerging embedded systems and their performance with respect to use in a particular application as a software PBX. The theoretical part defining the basic concepts of the thesis will focus on an overview of the currently available systems on the market and their usefulness in small PBXs. Also discussed is the issue of the call through the IP network and used protocols for purposes of transmission of signaling and voice. The practical part consists in proposing a comprehensive testing of embedded systems with the exchange, detecting the maximum allowable operating load of embedded systems, using test software SIPP, SIP Tester and iperf. The conclusion is devoted resulting summary of the results obtained and the subsequent evaluation of the deployment of these systems in practice.

Index Terms

VoIP, SIP, RTP, Asterisk, SIPP, iPerf, embedded system, Raspberry Pi, Orange Pi, Banana Pi

Obsah

1	Zadání práce	8
2	Vestavěné (embedded) systémy	9
2.1	Parametry vestavěných systémů	9
2.2	RaspberryPi 2 Model B	10
2.3	Banana Pi	11
2.3.1	Banana Pi BPI-M1+	11
2.3.2	Banana Pi BPI-M2 Quad-core	12
2.3.3	Banana Pi BPI-M3 Octa-core	12
2.4	Orange Pi	13
2.4.1	Orange Pi PC	13
2.4.2	Orange Pi One	14
2.5	CubieBoard 2	14
2.6	BeagleBone Black	15
2.7	UP	15
2.8	Pine A64+	16
2.9	Grandstream UCM 6102	17
2.10	Přehled vestavěných systémů	18
3	Voice over Internet Protocol (VoIP)	19
3.1	Session Initialization Protocol (SIP)	19
3.2	Real-time Transport Protocol (RTP)	21
4	Softwarové ústředny	23
4.1	Asterisk	23
4.1.1	Základní konfigurace	23
5	Testovací software	26
5.1	SIPp	26
5.1.1	Instalace SIPp	27
5.1.2	Vytvoření testovacích scénářů	28
5.2	iPerf	29
5.3	SIP Tester	30
6	Metodika testování	32
6.1	Registrace telefonních přístrojů	32
6.2	Simulace hovorů včetně přenosu hlasu	33
6.3	Simulace hovorů - přenos pouze signalizace	35
6.4	Sledované statistiky	36
7	Testované systémy	38
8	Výsledky testů	39
8.1	Raspberry Pi 2 Model B	39
8.1.1	Scénář REGISTER	39
8.1.2	Scénář INVITE s RTP	41

8.1.3	Scénář INVITE s přímým přenosem médií	46
8.2	Orange Pi PC	50
8.2.1	Scénář REGISTER	50
8.2.2	Scénář INVITE s RTP	54
8.2.3	Scénář INVITE s přímým přenosem médií	58
8.3	Grandstream UCM 6102	62
8.3.1	Scénář REGISTER	62
8.3.2	Scénář INVITE s RTP	64
9	Zhodnocení	66
	Seznam zkratk	68
	Seznam obrázků	71
	Seznam tabulek	71
	Seznam ukázek kódů	72
	Reference	73
	Seznam příloh	74
	Příloha A - Základní příkazy Asterisk konzole	75
	Příloha B - Testovací scénář REGISTER	76
	Příloha C - Testovací scénář INVITE s RTP	77
	Příloha D - Testovací scénář INVITE s přímým přenosem médií	80
	Příloha E - Konfigurační soubory CSV	84
	Příloha F - Nastavení ústředny Asterisk	86
	Příloha G - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Raspberry Pi 2 Model B	88
	Příloha H - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Orange Pi Pc	92
	Příloha I - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Grandstream UCM 6102	96
	Příloha J - Obsah příloženého CD	98

1 Zadání práce

Cíle této diplomové práce na téma Softwarové ústředny ve vestavěných systémech jsou stanoveny na základě důkladného prostudování problematiky softwarových ústředn a vestavěných systémů. Výstupem této práce bude zpracování problematiky vestavěných systémů a jejich využití v IP telefonii. Úvod práce bude zaměřen na vestavěné systémy, které jsou vhodné pro využití v praxi při provozování pobočkových softwarových ústředn.

Dalším cílem práce je zaměření se na jednotlivé softwarové ústředny, jejich vlastnosti, instalaci a základní konfiguraci pro realizaci hovoru. V této dílčí části práce bude zpracována komplexní problematika konfigurace softwarových ústředn pro uskutečnění takzvaného internetového volání. Poznatky budou zároveň využity pro realizaci softwarové pobočkové ústředny.

Před samotným testováním se autor práce zaměří na problematiku simulačních programů pro simulaci síťového provozu. Zejména na simulační program SIPp, který umožňuje realizovat spojení se softwarovou ústřednou na základě komunikačního protokolu SIP. Pro zatížení testovacího systému datovým provozem je možné využít program iPerf. Tento program dokáže realizovat zatížení datovým provozem na protokolu TCP, UDP.

Na základě poznatku a možných konfigurací simulačních programů budou autorem práce stanoveny testovací scénáře pro komplexní otestování plného provozního zatížení vestavěného systému. Součástí testovacích scénářů bude snaha zaznamenat vliv počtu současných hovorů včetně přenosu hlasu skrz ústřednu. Současně bude zaznamenán vliv operačního systému na maximální možný počet uskutečněných hovorů v jeden okamžik.

S využitím testovacích scénářů budou realizovány testy na jednotlivých vestavěných systémech, které budou k dispozici. Testy budou probíhat na systému RaspberryPi 2 Model B a na systému Orange Pi PC. V případě sehnání prostředků na další konkurenční systémy budou otestovány další konkurenční vestavěné systémy a zhodnoceny na základě výkonnostních parametrů.

Závěr bude tvořit srovnání získaných dat a zhodnocení, které z měřených zařízení dosáhlo nejlepších výsledků. S ohledem na důležité parametry bude sestaven přehled vestavěných systémů vhodný pro realizaci softwarové ústředny v malé firmě.

2 Vestavěné (embedded) systémy

Vestavěné systémy neboli jednodeskové počítače jsou dnes vyráběny ve velkých sériích a jsou komerčně velmi dobře dostupné. Na trhu je obrovská škála takových to zařízení, každé má jiné parametry a je primárně produkováno na určitý segment využití. Dnes již skoro každý vestavěný systém má podporu napříč mnoha operačními systémy, dokonce jsou pro ně vyvíjeny platformy přímo na míru. Většina těchto vytvořených operačních systémů je založena na Linuxovém jádře a tím přináší velké množství využití napříč technologiemi například web-server, multimediální centrum v domácnosti, ale také pro realizaci v automatizaci atd.

Vestavěné systémy jsou primárně vyvíjeny pro konkrétní aplikace a následně nasazovány v obtížných podmínkách, jako jsou nestálá teplota, velké výkyvy teploty, vibrace a mnoho dalších. Prakticky v každém domácím spotřebiči nalezneme pro jeho obsluhu jedinečný vestavěný systém, který byl přímo vyvíjen pro jeho funkci. V případě této diplomové práce bude využíváno vestavěných systémů, které mají univerzální uplatnění a lze na nich realizovat testování pro konkrétní aplikace. Mezi takovéto systémy patří například RaspberryPi, BeagleBone Black, Cubieboard, UP, BananaPi, Arduino a další. Jednotlivé systémy budou popsány v dalších kapitolách.

2.1 Parametry vestavěných systémů

Každý vestavěný systém má jiné parametry. Pro účely softwarové ústředny je potřeba dostatečná síťová konektivita, výkonný procesor, dostatečně velká paměť RAM, úložisko pro operační systém a softwarovou ústřednu. Konkrétní parametry záleží na tom, jak velkou provozní zátěž požadujeme od tohoto systému. Nejvíce nás bude limitovat výkon procesoru, jelikož pro jeden uskutečněný hovor je potřeba přenosová rychlost 64 kbit/s, bude dostačující 100 Mbit/s Ethernet. Některé systémy mají i Gigabitový Ethernet, ale pro tuto realizaci nebude potřeba, jelikož procesory ve vestavěných systémech nedosahují takového výpočetního výkonu, aby zpracovaly tak velké množství hovorů. Dále je rozhodující způsob napájení a spotřeba. Mnohá zařízení jsou schopna běžet i s velmi malou spotřebou a tím velmi ušetřit provozní náklady.

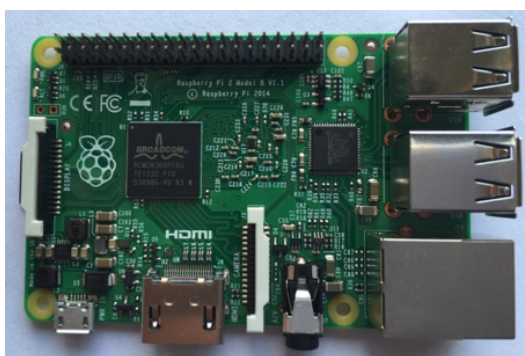
Jednotlivé systémy budou porovnávány podle následujících parametrů:

- Procesor
- Síťové připojení
- Další podporované standardy (USB, HDMI, ...)
- Operační paměť RAM
- Napájení, spotřeba systému

V neposlední řadě je potřeba také porovnat výkon v poměru s pořizovací cenou. Tyto řešení softwarové ústředny by měli pomoci malým firmám velmi snadno a za nízké pořizovací náklady realizovat internetové volání a hovory v rámci firmy, bez nutnosti pořizovat nákladné komerční řešení pobočkové ústředny, včetně telefonních přístrojů. Telefonní přístroje mohou být nahrazeny softwarovými klienty v pracovních počítačích, případně aplikacemi v mobilních systémech.

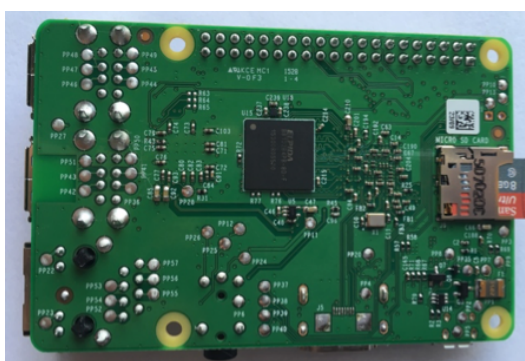
2.2 RaspberryPi 2 Model B

RaspberryPi 2 Model B je již druhá generace těchto vestavěných systémů, oproti první generaci přináší velmi snadnou instalaci operačního systému, kterou zvládne i běžný uživatel, dále výkonnější procesor řady ARM Cortex – A7 s taktem 900 MHz. Disponuje operační pamětí o velikosti 1GB RAM. Součástí je 100 Mbit/s Ethernet s rozhraním RJ-45, zajišťující síťovou konektivitu. Pro obrazový výstup je zde rozhraní HDMI a následně pro připojení periférii čtyři porty USB 2.0. Na základní desce se nachází 40 GPIO pinů pro využití při programování a realizaci různorodých aplikací. Samozřejmě nechybí audio výstup. Dále vlastní rozhraní pro připojení periférii, například dotykový displej, kamera a další. Jako datové úložiště jsou využívány MicroSD karty, zařízení je vybaveno slotem na MicroSD kartu.



Obrázek 2.1: RaspberryPi 2 Model B – pohled shora.

RaspberryPi 2 patří mezi nejpopulárnější vestavěné systémy. V případě RaspberryPi existuje celá řada komunit a implementací operačních systémů. Mezi podporované OS patří vlastní vyvinutý operační systém Raspbian, dále Ubuntu Mate, Snappy Ubuntu, OPNELEC a s touto verzí přichází i podpora Microsoft Windows 10 pro Internet věcí.



Obrázek 2.2: RaspberryPi 2 Model B - spodní strana.

Napájení je realizováno prostřednictvím microUSB konektoru. Zařízení je napájeno 5V a doporučený napájecí proud je minimálně 1A, pro maximální výkon je doporučen zdroj o velikosti napájecího proudu 2A. Nesporná výhoda RaspberryPi spočívá v možnosti napájet toto zařízení za pomoci nabíjecího adaptéru běžného mobilního telefonu.

2.3 Banana Pi

Vestavěné systémy pod názvem Banana Pi vznikaly až po RaspberryPi a do jisté míry z něho vychází. Banana Pi vzniká jako vylepšená a upravená verze oproti svému předchůdci a rozvíjí se konkurence v open source systémech. Každý tento vestavěný systém je součástí open source hardware a je tedy volně dostupný. Mezi jeho výhody oproti RaspberryPi patří zabudovaná tlačítka na základní desce (On/Off, reset), kompatibilita s příslušenstvím pro RaspberryPi (displeje, kamery). Banana Pi je vydáváno v několika verzích podle výbavy a výkonu.

První verzí vestavěného systému byl Banana Pi BPI-M1 Classic, tato verze byla přímou konkurencí první verze systému Raspberry Pi a je již dnes příliš zastaralá, a proto zde o ní nebude zmíněno a v současné době neposkytuje dostatečný výkon. Nové generace vestavěného systému Banana Pi přináší lepší výkon, proto jsou zde uvedeny pouze nové modely.

2.3.1 Banana Pi BPI-M1+

Vylepšená verze původního Banana Pi nese označení BPI-M1+ a přichází s výkonnějším procesorem, konkrétně řady A20 ARM Cortex A7. Jedná se o dvou jádrový procesor s taktem 1 GHz. Disponuje operační pamětí DDR3 o velikosti 1GB, Gigabitový Ethernet, obrazový výstup HDMI, audio Jack, GPIO porty a 2x USB. Dále má integrovaný čip pro bezdrátové připojení Wi-Fi s anténou, ovládací tlačítka systému a slot na MicroSD kartu. Napájení je zde provedeno stejně, tedy přes microUSB.

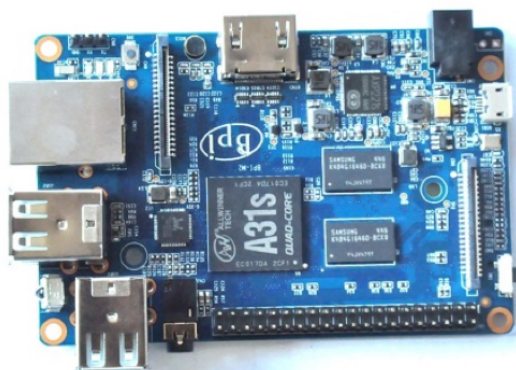


Obrázek 2.3: Banana Pi BPI-M1+.[2]

Mezi nesporné výhody patří vyšší výkon, možnost připojit zařízení k Wi-Fi, dále je možné připojit pevný disk či optickou mechaniku přes rozhraní SATA, které je integrováno přímo na desce. Zařízení je kompatibilní s většinou operačních systémů jako jsou Android, Raspbian, Ubuntu, OpenSUSE, Debian, Bananian a mnoho dalších.

2.3.2 Banana Pi BPI-M2 Quad-core

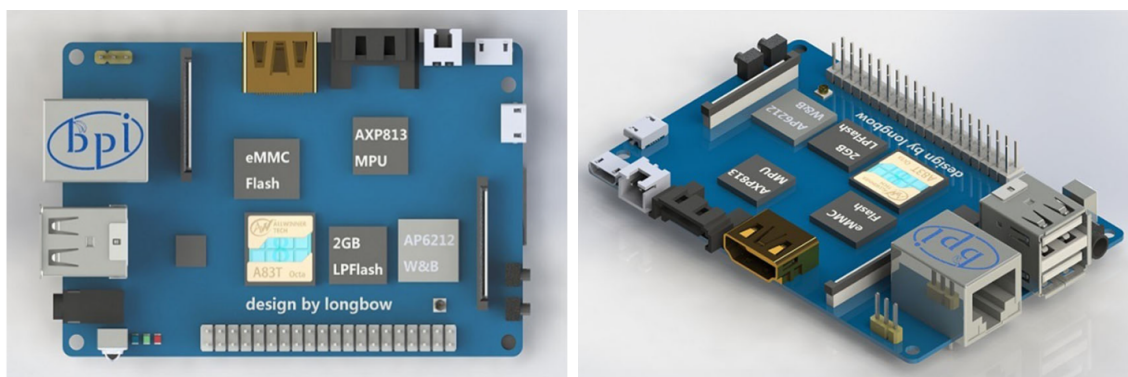
Nástupcem Banana Pi BPI-M1+ je vylepšená verze M2, která oproti původní verzi nabízí mnohonásobný výpočetní výkon procesoru. Deska je osazena procesorem A31S řady ARM Cortex A7, čtyř jádrový procesor s taktom 1 GHz, který je možné přetaktovat až na 1,2 GHz. Procesor má cache paměť L1 256 KB a L2 1MB. Oproti předchůdci A20 nabízí téměř dvojnásobný výkon. Oproti M1+ má 4 USB porty a napájet lze zařízení opět přes microUSB, nebo napájecím adaptérem 5V DC / 2A. V této verzi chybí možnost připojení přes SATA rozhraní.



Obrázek 2.4: Banana Pi BPI-M2 Quad-core.[3]

2.3.3 Banana Pi BPI-M3 Octa-core

Nejvýkonnější deskou řady Banana Pi je deska BPI-M3 Octa-core, disponuje osmi jádrovým procesorem A83T řady ARM Cortex A7, 512 kB L1 a 1 MB L2 cache paměti, s taktovací frekvencí až 2 GHz. Na desce je osazeno 2GB DDR3 RAM, gigabitový Ethernet, Wi-Fi modul, Bluetooth 4.0, HDMI, 2x USB, On/Off a reset tlačítko. Oproti ostatním vestavěným systémům tento má integrovaný paměťový modul eMMC o velikosti 8 GB, dále podporu SATA rozhraní a MicroSD karet. Napájení lze opět řešit přes microUSB nebo skrz 5V DC konektor.



Obrázek 2.5: Banana Pi BPI-M3 Octa-core.[4]

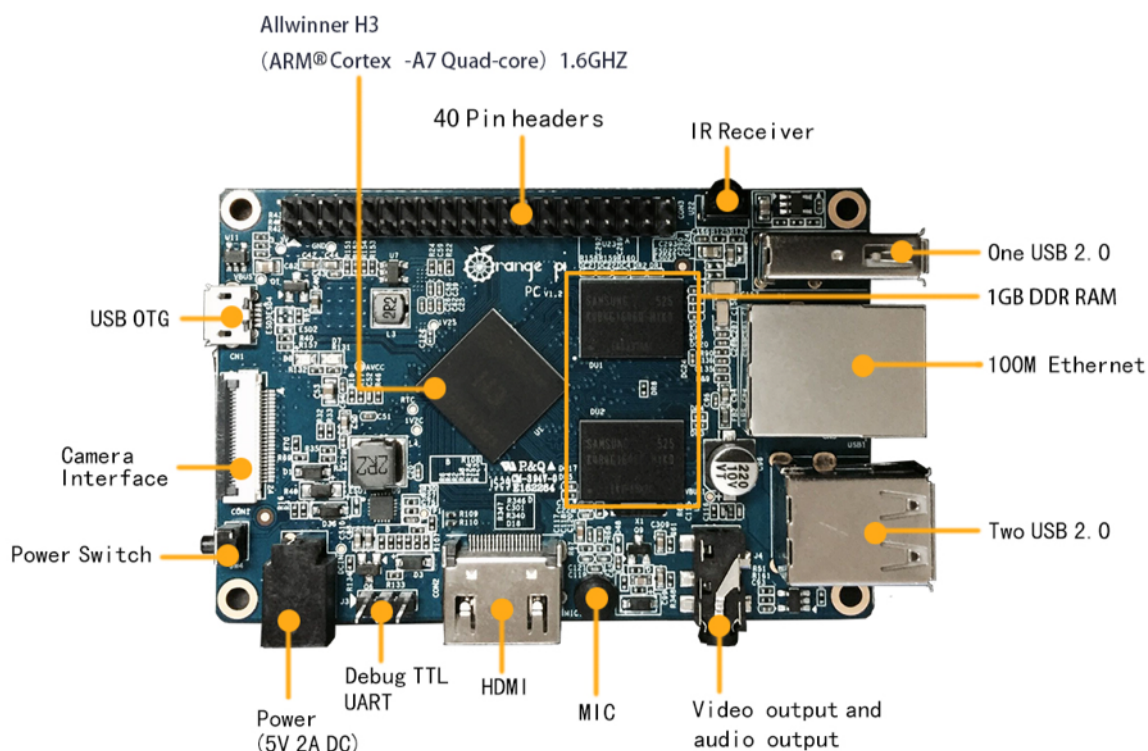
System má podpora většiny operačních systému Linux, včetně Microsoft Windows 10 pro Internet věcí.

2.4 Orange Pi

Po velkém úspěchu „ovocného“ konkurenta RaspberryPi vzniká řada dalších „ovocných“ vestavěných systémů. Jelikož tyto systémy vznikají až po úspěchu jejich předchůdce, odstraňují některé nedostatky původních systémů a přicházejí ve vylepšených variantách s větším výkonem. Ve vestavěných systémech Orange Pi je ve většině modelů k dispozici procesor ARM řady A7 od firmy AllWinner technology s typovým označením H3. Tato platforma vzniká a vyrábí se v Číně, konkrétně firmou Shenzhen Xunlong Software CO., Limited.

2.4.1 Orange Pi PC

Tato varianta nabízí čtyřjádrový procesor H3 Cortex-A7 na frekvenci 1,6 GHz, 1 GB DDR3 RAM, 100 MBit/s Ethernet, slot na MicroSD kartu, HDMI konektor a další shodné rozhraní jako má například Raspberry Pi. Nespornou výhodou oproti Raspberry Pi je větší výkon procesoru, on/off tlačítko a samozřejmě cena, která se pohybuje okolo 15-ti US dolarů. Celé zařízení je opět napájeno zdrojem o velikosti 5V/2A.

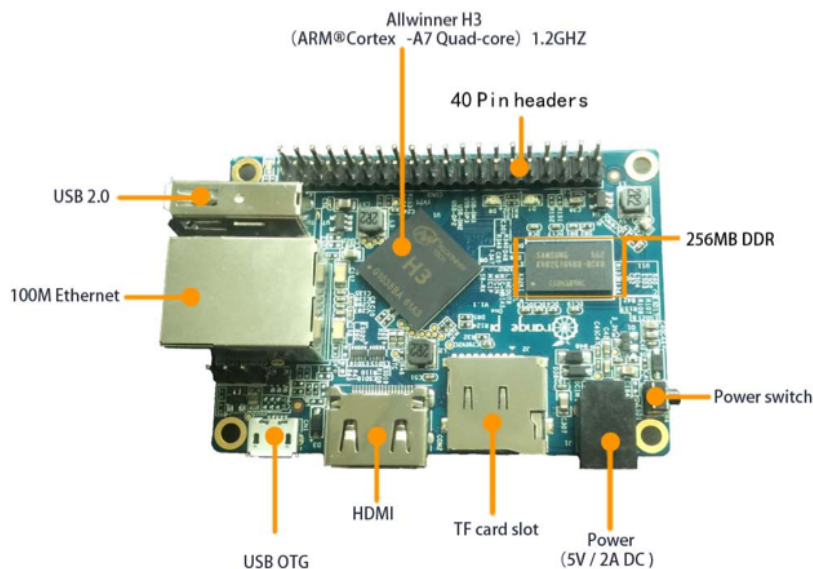


Obrázek 2.6: Popis rozhraní Orange Pi PC.[5]

Většina systémů je vyvíjena pro použití v domácnosti jako malé web servery, multi-mediální centra k televizím, řídicí desky k diskům pro tvorbu NAS a mnoho dalších uplatnění. Proto se velmi často zaměřují na výkon v oblasti videa z možnosti ovládní pomocí infračerveného záření. Většina prvků je kompatibilních s malými dotykovými displeji a za pomoci vhodných softwarů lze zrealizovat téměř jakékoliv zařízení.

2.4.2 Orange Pi One

Na začátku roku 2016 byl představen nový miniaturizovaný model Orange Pi One, který nabízí velice zajímavý výkon a je k dispozici za velmi nízkou cenu. Jako většina modelů Orange Pi i tento model je osazen procesorem AllWinner H3 s architekturou ARM Cortex A7 na frekvenci 1,2 GHz a 512 MB DDR3 RAM. Deska má velmi kompaktní rozměry, proto není osazena velkým počtem rozhraní. Je zde k dispozici 100 MBit/s Ethernet, HDMI a 1 USB port.



Obrázek 2.7: Popis rozhraní Orange Pi One.[6]

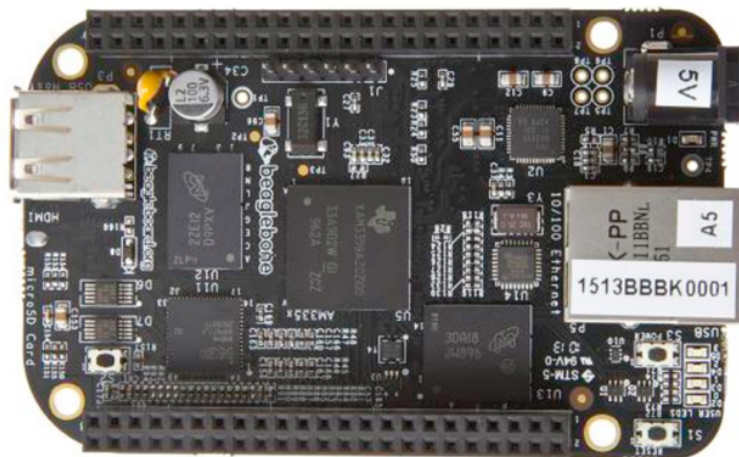
Pro operační systém je k dispozici slot na microSD kartu. Napájení je řešeno přes standardní 5V zdroj. Orange Pi One má podporu napříč různými OS, jako jsou například Android, Ubuntu, Debian a dokonce je kompatibilní s Raspbianem (upravený OS pro Raspberry Pi). Cena se pohybuje okolo 10-ti US dolarů.

2.5 CubieBoard 2

Mezi méně známé vestavěné systémy patří open source platforma CubieBoard, která má již několik vývojových řad svých jednodeskových platforem. CubieBoard je jednou z mála vývojových skupin, zabývajících se možností zřetěžit více těchto vestavěných systémů a vytvořit tím větší výkonovou platformu pro provozování náročnějších aplikací, například webový cloud, webserver a další. Zařízení má procesor AllWinner A20 s frekvencí 912 MHz, 1 GB DDR3 RAM a disponuje 3,4 GB vnitřní paměti typu flash. Pro další rozšíření paměti je k dispozici slot na microSD kartu a konektor SATA pro připojení pevného disku. Síťovou konektivitu zajišťuje 100 MBit/s Ethernet a podpora USB Wi-Fi. Obdobně jako všechny vestavěné systémy má i CubieBoard rozhraní HDMI, USB a pro napájení lze využít USB konektor nebo standardní rozhraní pro napájení 5V/2A DC. Pro tuto desku je vyvíjen speciální operační systém Cubian, který má linuxové jádro a je postaven na Debianu. Podpora je napříč všemi OS, například Android, Debian, Fedora a další.

2.6 BeagleBone Black

BeagleBone Black je vestavěný systém postavený na architektuře ARM Cortex A8. Výpočetní výkon zajišťuje procesor AM3358 od firmy Texas Instruments na frekvenci 1 GHz. Na desce je paměť typu flash o velikosti 4 GB, paměť RAM o velikosti 512 MB DDR3. Konektivita je velmi podobná jako u všech ostatních desek, čili USB, HDMI, 100 MBit/s Ethernet, který má vlastní řadič. Paměť lze rozšířit pomocí microSD karet.

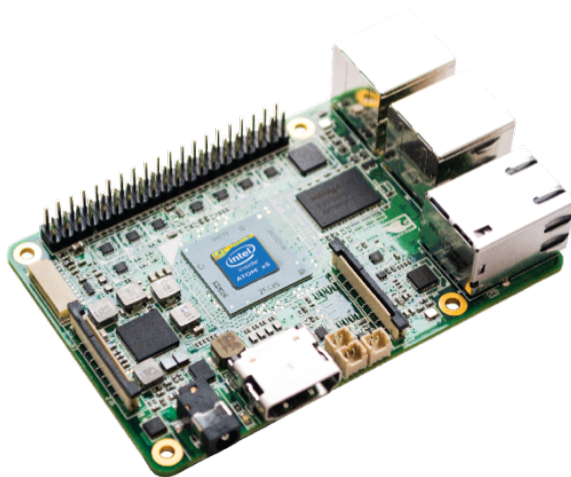


Obrázek 2.8: Beaglebone Black.[7]

Na zařízení BeagleBone je možné spustit řadu operačních systémů, například Debian, Android, Ubuntu a další. Napájení je realizováno opět pomocí 5V/2A DC. Udávaný odběr zařízení je 210 až 460 mA při 5V. Takto malý odběr umožňuje snížit energetické nároky na minimum a pro nepřetržitý provoz velmi výrazně snížit náklady na provoz tohoto systému. Cena uvedeného vestavěného systému se pohybuje okolo 70-ti US dolarů. Oproti konkurenčním systémům je cena vysoká.

2.7 UP

Asi nejzajímavějším a velmi výkonným vestavěným systémem je UP. Již z názvu vyplývá, že se jedná o velký posun v této oblasti. Celý systém vychází z koncepce RaspberryPi a je pouze jeho modifikací. Vestavěný systém UP je teprve na počátku vývoje. Jeho první generace má nespornou výhodu oproti ostatním, má plnohodnotný 64 bitový procesor Intel Atom X5-Z8300 s taktem až 1,86 GHz, cache paměti 2MB a čtyřmi jádry. Deska je dále osazena 4 porty USB 2.0, HDMI portem, síťovou kartou Gigabit Ethernet a 40 GPIO piny. Vestavěný systém UP je navržen pro nejnáročnější aplikace a je tedy vybaven 1 nebo 2 GB DDR3 RAM na 1600 MHz a vlastní eMMC paměti o velikosti 16 nebo 32 GB.

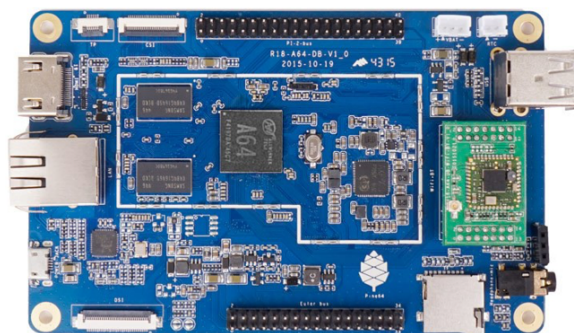


Obrázek 2.9: Vestavěný systém UP.[8]

System UP lze napájet 5V DC pomocí napájecího konektoru. Bohužel zde není možnost napájet prostřednictvím USB jako u předchozích systémů. Výkon a architektura procesoru nám umožní všestranné použití v jakékoliv oblasti. Je zde plná podpora Windows 10, což by mohlo být výhodné pro nasazení v domácnostech. Samozřejmě nechybí podpora operačních systémů s linuxovým jádrem a systému Android.

2.8 Pine A64+

Vestavěný systém Pine je navrhnout jako první 64 bitový systém dostupný za nízkou cenu v rozmezí 15-ti až 20-ti US dolarů podle konfigurace. Ve všech modelech je k dispozici 64 bitový procesor ARM Cortex A53 na frekvenci 1,2 GHz. Verze A64+ má oproti základní verzi lepší síťovou konektivitu, nabízí Gigabitový Ethernet port, 2 x USB, HDMI výstup pro obraz a 1 GB DDR3 RAM. Tato verze má oproti jiným modelům vestavěnou 3,7 V baterii, kterou lze dobíjet.



Obrázek 2.10: Pine A64+.[9]

Pine A64 lze napájet přes standardní microUSB konektor 5 V. Udávaná spotřeba výrobce je 2,5 W. Na napájení tedy postačuje standardní nabíječka mobilního telefonu s výstupním proudem 1 A. Zařízení má prozatím podporu pro Android a Linux, ale s ohledem na stáří této desky se bude podpora různých operačních systému ještě rozvíjet.

2.9 Grandstream UCM 6102

Zařízení od firmy Grandstream není tak úplně vestavěným systémem jako předchozí uvedené systémy. Jedná se přímo o IP ústřednu, která je implementována pro jednoznačné využití a neumožňuje žádné jiné funkce. Toto zařízení je zde uvedeno pro jeho velmi podobnou výkonnost s vestavěnými systémy jako jsou například Raspberry Pi, Orange Pi a další. Tato ústředna disponuje procesorem řady ARM A8 s frekvencí 1 GHz, 512 MB RAM, 2x Gigabitový Ethernet port a také konektivitu pro připojení analogových telefonů. Ústředna je napájena pomocí 12 V adaptéru a udávaný odběr je 1,5 A. Zařízení je vytvořené pro jednoduchou správu a instalaci, dokáže zároveň fungovat jako DHCP server, web server, na kterém je grafická nadstavba pro správu ústředny a další užitečné nástroje.



Obrázek 2.11: Grandstream UCM 6104 [10]

Na obrázku 2.11 je vyobrazen vylepšený model UCM 6104, který oproti modelu UCM 6102 nabízí větší počet portů pro připojení klasických analogových telefonů, větší výkon a tím umožňuje více současných volání. Základní model UCM 6102 by měl dle údajů výrobce zvládnout obsloužit 30 současných hovorů.

2.10 Přehled vestavěných systémů

Vestavěných systémů je mnoho a občas se liší jen nepatrně. Pro účely softwarové ústředny nejsou některé parametry až tak podstatné, a proto je potřeba vybrat pouze parametry, které jsou pro tuto aplikaci stěžejní. Mezi ně patří výkon procesoru, síťová konektivita a operační paměť. Případně možnosti datového úložiště pro software ústředny, ale zde postačuje pro tyto účely rychlost SD karty. Je však nutné vzít v úvahu, že pro reálné a dlouhodobé nasazení není SD karta vhodným paměťovým médium. Při testování nedojde ke zkreslení výsledků, ale pro dlouhodobý běh systému je nutné zvolit spolehlivější paměťové médium než je právě SD karta. Přehled jednotlivých důležitých parametrů vestavěných systémů je uveden v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Přehled vybraných parametrů vestavěných systémů.

Vestavěný systém	Procesor	Frekvence	RAM	Síťová konektivita	Napájecí rozhraní	Cena
RaspberryPi 2 Model B	BCM2836	0,9 GHz	1 GB DDR3	100 MBit/s Ethernet	5V/2A DC	39 \$
BPI-M1+	A20 Cortex-A7	1 GHz	1 GB DDR3	1 GBit/s Ethernet, Wi-Fi	5V/2A DC	40 \$
BPI-M2	A31S Cortex-A7	1 GHz	1 GB DDR3	1 GBit/s Ethernet, Wi-Fi	5V/2A DC	55 \$
BPI-M3	A83T Cortex-A7	2 GHz	2 GB DDR3	1 GBit/s Ethernet, Wi-Fi	5V/2A DC	78 \$
Orange Pi PC	H3 Cortex-A7	1,6 GHz	1 GB DDR3	100 MBit/s Ethernet	5V/2A DC	15 \$
Orange Pi One	H3 Cortex-A7	1,2 GHz	512 MB DDR3	100 MBit/s Ethernet	5V/2A DC	10 \$
CubieBoard 2	AM3358 ARM A8	1 GHz	512 MB DDR3	100 MBit/s Ethernet	5V/2A DC	70 \$
UP	Intel Atom X5-Z8300	1,86 GHz	1 GB DDR3	1 Gbit/s Ethernet	5V/2A DC	99 \$
PINE A64+	64 bit ARM A53	1,2 GHz	1 GB DDR3	1 Gbit/s Ethernet	5V/1A DC	19 \$
Grandstream UCM 6102	ARM A8	1 GHz	512 MB DDR3	2x 1 Gbit/s Ethernet, 2x FXO, 2x FXS	12V/1,5A DC	399 \$

3 Voice over Internet Protocol (VoIP)

V rámci rozvoje internetu a datových sítí se začali vytvářet nové možnosti přenosu telefonních hovorů prostřednictvím takto nově vznikajících sítí. Hlavním cílem bylo umožnit přechod s okruhových telefonních sítí do sítí paketově orientovaných. Tato problematika se zaměřuje na přenos hlasových dat prostřednictvím IP sítě - Voice over Internet Protocol (VoIP). Celý přenos je rozdělen do dvou částí, část signalizační a část přenosu digitalizovaného hlasu. Pro signalizaci jsou využívány nejčastěji protokoly SIP a H.323. K přenosu digitalizovaného hlasu je využíván Real-time Transport Protocol (RTP).

V této diplomové práci bude zmíněn pouze protokol SIP a RTP, které budou využity pro analýzu a testy vestavěných systémů. Protokol H.323 vznikl jako doporučení ITU-T, který definuje signalizaci telefonních hovorů přes libovolnou paketovou síť.

3.1 Session Initialization Protocol (SIP)

Protokol SIP je standardizován skupinou IETF jako RFC 3261 a mnoho dalších doporučení. V doporučení RFC 3261 jsou základní popisy a definice protokolu SIP. Protokol SIP je textově orientován a je přenášén v textové formě. SIP lze přenášet pomocí UDP, TCP případně zabezpečeně pomocí TLS. SIP vychází ze standardů HTTP a využívá model komunikace klient-server.

Součástí SIP protokolu je takzvaný Session Description Protocol (SDP), který definuje jakými způsoby je možná komunikace jednotlivých zařízení. V praxi je pomocí tohoto protokolu popisováno s jakými kodeky je schopné zařízení, se kterým komunikujeme spolupracovat. Nejčastěji bývá používán kodek G.711, případně G.722.

Struktura SIP protokolu je tvořena textově a lze při zachycení paketu přímo vyčíst přenášené informace. Hlavička obsahuje:

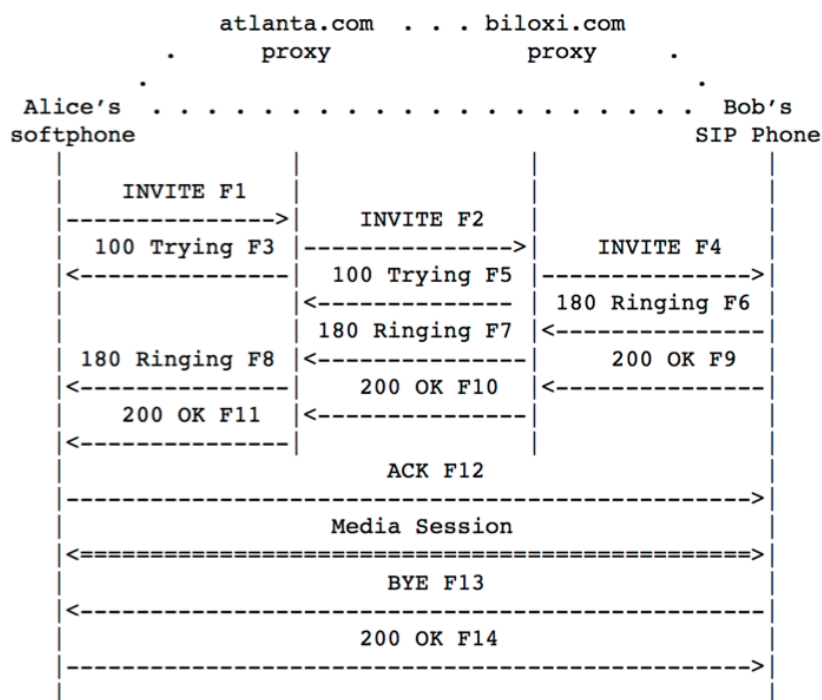
```
INVITE sip:[service]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
  Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
  From: sipp <sip:sipp@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
  To: sut <sip:[service]@[remote_ip]:[remote_port]>
  Call-ID: [call_id]
  Content-Type: application/sdp
  Content-Length: [len]
  CSeq: 1 INVITE
  Contact: sip:sipp@[local_ip]:[local_port]
  Max-Forwards: 70

v=0
o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
s=SJphone
c=IN IP[local_ip_type] [local_ip]
t=0 0
m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 0 97 8 18
  a=rtpmap:0 PCMU/8000
  a=rtpmap:97 SPEEX/8000
  a=rtpmap:8 PCMA/8000
  a=rtpmap:18 G729/8000
```

Ukázka kódu 3.1: Ukázka SIP protokolu

Jak je vidět na ukázce 3.1 SIP zprávy INVITE, zpráva musí obsahovat od koho je iniciováno spojení (From), komu chceme volat (To), identifikátor spojení Call-ID, následně kontakt na klienta, Via určuje kde byl vytvořen požadavek a kam má být zaslána odpověď. Následně maximální počet přesměrování. Ve spodní části je uveden popis pomocí SDP protokolu, kde je seznam podporovaných kodeků, které jsou nabízeny druhé volané straně a mezi nimi se vybere jeden společný, v případě že nemají ani jeden společný kodek dojde k ukončení spojení.

V SIP protokolu se posílané zprávy rozdělují na metody a odpovědní kódy. Mezi metody patří zprávy typu REGISTER, INVITE, ACK, CANCEL, BYE a OPTIONS. Metoda REGISTER se používá pro přihlášení klienta k ústředně, INVITE slouží k zahájení signalizace hovoru, ACK pro potvrzování, CANCEL pro zrušení spojení v případě, kdy účastník na druhé straně neodpovídá. Metoda BYE ukončuje spojení, jedná se analogicky o stejný proces, kdy dojde k ukončení hovoru zavěšením sluchátka telefonního aparátu. Metodou OPTIONS můžeme přenášet informace o stavu serverů a jejich přístupnosti. V návazných doporučeních, která byla vydávána jako úpravy v protokolu SIP jsou uvedeny další metody, které ale nejsou pro účely této práce podstatné. Druhým typem zpráv jsou odpovědní třímístné číselné kódy, které následují jako odpovědi na metody. Odpovědi začínající 1 jsou dočasné odpovědi, které mají pouze informovat protistranu o přijetí požadavku a čekají na další odpověď. Kódy začínající 2 značí úspěšné splnění metody, odpovědi zahájené číslem 3 znamenají informaci o přesměrování, odpovědi začínající 4 značí chybu na straně klienta například neautorizace, zakázání přístupu a další. Odpovědi začínající od čísla 5 značí chybu serveru, například nedostupnost serveru, jako poslední jsou kódy od čísla 6 a ty značí chybu obecného charakteru.



Obrázek 3.1: Průběh signalizace telefonního hovoru pomocí SIP protokolu.[11]

Na obrázku 3.1 je znázorněn průběh signalizace při realizaci hovoru prostřednictvím protokolu SIP. Nejdříve je odeslána zpráva INVITE, nebo-li pozvání k hovoru. Následně ústředna odpoví dočasnou zprávou 100 Trying. Protějšší klient odpoví zprávou 180 Ringing. V tuto chvíli dochází k vyzvánění volaného. V okamžiku přijetí hovoru volaného dojde k potvrzení zprávou 200 OK. Volající potvrdí metodou ACK a následně je již přenos médií. Médii může být hlas případně video. Po ukončení pošle strana, která ukončuje spojení BYE, poté již dojde pouze k odpovědi 200 OK a tím celé spojení končí.

SIP má ve své definici různé typy serverů:

- **Redirect server** – server pouze odpovídá zprávou 301 nebo 302 o přesměrování a odkáže na novou adresu, kde by se měl nacházet volaný
- **Stateless proxy** – server pouze přeposílá zprávy na základě DNS záznamů a dalších záznamů v databázích, nepamatují si co kam posílají
- **Statefull proxy** – sever, přeposílá zprávy, ale má vlastní paměť a udržuje si stavy spojení, může zde probíhat i směrování hovorů
- **Registrar** – server, který za pomoci zpráv REGISTER registruje účastníky v síti
- **B2BUA** – Back to Back User Agent, tento typ se chová jako ústředna na jedné straně hovor ukončuje a na druhé vytváří nové spojení, lze takto měnit kodeky mezi zařízeními, která si nerozumí navzájem.
- **User Agent** - koncový bod, může být v režimu Client (UAC), tedy generuje SIP zprávy (např. INVITE a další) a nebo v režimu Server (UAS) - tedy odpovídá na příchozí SIP zprávy, každý koncový bod musí podporovat oba režimy, záleží pouze na směru volání a podle toho volí konkrétní režim

Pro přenos médií je využíván protokol RTP, případně jeho šifrovaná varianta SRTP. Komunikace pomocí protokolu RTP probíhá vždy na sudém portu a na následujícím lichém portu je protokol Real-time Transport Control Protocol (RTCP), který v pravidelných intervalech posílá informaci o kvalitě přenosu. Přenos médií může být realizován napřímo mezi koncovými zařízeními a nebo prostřednictvím RTP proxy. V případě RTP proxy dochází k zatížení SIP serveru. Zpravidla prochází stream skrz něj a je nutné počítat s větší zátěží serveru. Varianta s nepřímými médii je často využívána operátory pro možnost odposlechu hovorů. RTP nemusí vždy fungovat v každé oblasti, časté důvody nefunkčnosti jsou způsobeny špatně nakonfigurovaným firewallem, případně problémy s NAT.

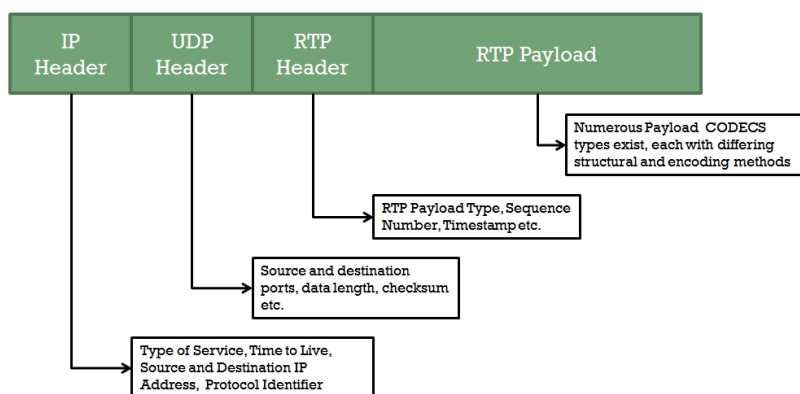
3.2 Real-time Transport Protocol (RTP)

V paketových sítích je nejčastěji pro přenos hlasu používán Real-time Transport Protocol (RTP), který umožňuje přenos médií prostřednictvím paketových sítí. Protokol je uzpůsoben tak, aby docházelo k co nejmenším zpožděním a výpadkům přenášeného audio, případně videosignálu. Tento protokol byl vydán již v roce 1996 jako RFC 1889 a později byl nahrazen RFC 3550.

Přenos médií přes paketové sítě je velmi problematický a musí brát v úvahu veškeré možné zpoždění vzniklé zabalením paketu, zpoždění přenosu skrz IP síť a nakonec zpoždění v bufferu, který využívá RTP. RTP ve své definici využívá tzv. jitter bufferu, který shromažďuje pakety s přenášenými médii a přehrává je se zpožděním za účelem vyrovnání možného zpoždění vlivem různých přenosových cest napříč IP sítí. Do celkového zpoždění přenosu se započítává doba šíření sítí, zpoždění v bufferu a čas zabalení paketu. Celková doba zpoždění dle ITU by neměla přesáhnout 150 ms. V případě velkého zpoždění nebude pro komunikující uživatele telefonní hovor srozumitelný a bude docházet k nedorozumění uživatelů.

Pro garanci kvalitního spojení je nutné aplikovat v celé síti parametry QoS. Pro přenos může být využívána celá řada kodeků. Mezi nejvyužívanější kodeky patří kodek G.711, G.729, GSM a další. Kodek G.711 zahrnuje vlastnosti A-zákona a μ -zákona, který definovala ITU-T. A-zákon je používán v Evropě a μ -zákon pro Ameriku a Japonsko. Kodeky lze klasifikovat z hlediska potřebné šířky pásma pro přenos a podle kvality komprese a podle MOS, nebo-li kvality přenosu z hlediska subjektivního hodnocení uživatele.

VoIP RTP Packet Structure



Obrázek 3.2: Struktura RTP paketu.[13]

Paket RTP streamu je doplněn o hlavičku RTP a RTP data. V hlavičce jsou informace o typu dat, číslo vyslané sequence, časová stopa dat a další. Protokol RTP je vždy vysílán na sudém portu a je přenášen pomocí UDP. Součástí doporučení je Real-time Transport Control Protocol (RTCP), který vysílá na portu o 1 vyšším než RTP. Při přenosu je prostřednictvím RTCP vysílána jednou za 5 až 10 s informace o kvalitě streamu.

4 Softwarové ústředny

Softwarové ústředny nahrazují komplikované ústředny pro pevné volání v sítí a poskytují volání skrz IP síť, zároveň umožňují propojit systémy VoIP s Public Switched Telephone Network (PSTN). Hlavním úkolem softwarové ústředny je přenášet a řídit signalizaci telefonního provozu. Spojovací pole je realizováno softwarově. Softwarová ústředna má tu výhodu, že může být provozována takřka na libovolné platformě. Tyto ústředny přináší řadu výhod oproti klasickým ústřednám. Mohou být doplněny o mnoho přídatných modulů, které pomáhají v komunikaci volajících, například IVR systém.

Většina softwarových ústředen je postavena na protokolu SIP. V případě komplexního VoIP systému od firmy CISCO je komunikace mezi prvky většinou řízena pomocí protokolu Skinny Call Control Protocol (SCCP) - proprietární řešení signalizace firmy CISCO, samozřejmě je zde i podpora SIP. Nejdůležitější částí ústředny je signalizace, která určuje veškerý provoz. Protokol SIP byl popsán v předcházející kapitole. Existuje mnoho typů ústředen, ale pro potřebu této diplomové práce se zaměřím pouze na open source řešení ústředny pod názvem Asterisk.

4.1 Asterisk

Asterisk je software, který dokáže implementovat veškeré funkce pobočkové ústředny na libovolném serveru a mnoho dalších funkcí. Vývoj Asterisku začal v roce 1999, kdy byl zveřejněn počáteční kód. Posléze se začal velmi rozvíjet a nyní je vyvíjen uživatelskou komunitou a sponzorován firmou Digium. Tato platforma je šířena volně pod licencí GNU General Public License (GNU). Asterisk je kompatibilní s libovolnou distribucí Linux či Unix a stačí pro jeho funkci klasický počítač nebo vestavěný systémem. Systém dokáže vytvářet několik funkcí najednou a zajistit kompatibilitu napříč technologiemi jako například PSTN, SIP a další. Jedná se o nejpoužívanější softwarovou ústřednu a existuje řada modifikací a realizací pro nasazení v reálném prostředí. Tento software nám dokáže nahradit pobočkovou ústřednu, hlasovou schránku, konference (hlasové i obrazové), interaktivního hlasového průvodce tzv. IVR a mnoho dalších. Zároveň lze připojit tuto softwarovou ústřednu i do stávající klasické telefonní sítě (PSTN). V současné době je využíván ve více než 170 zemích světa více jak tisíci uživateli.[14]

Pro účely této diplomové práce bude využita softwarová ústředna Asterisk v základním režimu, kdy řídí a spojuje signalizaci protokolu SIP mezi dvěma zařízeními v sítí. Při výkonnostních testech bude Asterisk zároveň plnit úkol media serveru pro obsluhu hlasových dat pomocí protokolu RTP.

4.1.1 Základní konfigurace

Základní konfigurace softwarové ústředny se provádí pomocí souborů uložených v adresáři `/etc/Asterisk`. Při instalaci se v tomto adresáři vytvoří mnoho konfiguračních souborů, které nejsou pro funkci protokolu SIP potřeba. Proto je nejdříve nutné celý adresář smazat a vytvořit jen soubory, které budou využity. Při konfiguraci je nutné začít v souboru `asterisk.conf`, kde nastavujeme pro Asterisk důležité proměnné, které ukazují v jakých adresářích se nachází konfigurační soubory, moduly, soubory se zvukem, databáze a prostor pro soubory logu.

```
[directories]
astetcdir => /etc/asterisk ; adresář s konfiguračními soubory
astmoddir => /usr/lib/asterisk/modules ; adresář s moduly
astvarlibdir => /var/lib/asterisk ; adresář pro využívané knihovny
astdatadir => /var/lib/asterisk ; adresář pro uložení zvukových nahrávek
astdbdir => /var/lib/asterisk ; adresář pro uložení vnitřní databáze Asterisku
astrundir => /var/run/asterisk ; adresář, kde jsou uloženy informace o procesech
astlogdir => /var/log/asterisk ; adresář s log souborem
```

Ukázka kódu 4.1: Základní konfigurace souboru asterisk.conf

Dalším důležitým konfiguračním souborem je soubor `sip.conf`, ve kterém definujeme veškeré parametry souvisejí s protokolem SIP. Celý soubor je rozdělen do sekcí, v první sekci se nastavují parametry globálního charakteru aplikované na celý systém. V dalších částech konfiguruje jednotlivé uživatele (telefony) a případně nakonfiguruje odchodí trunk.

```
[general]
context=local
dtmfmode=rfc2833
disallow=all
allow=alaw
transport=udp
encryption=no
nat=no
directmedia=nonat
alwaysauthreject=yes

[1001]
type=friend
host=dynamic
username=1001
userid=telefon1 1001
secret=Silneheslo123
```

Ukázka kódu 4.2: Konfigurační soubor sip.conf

Na ukázce kódu 4.2 je základní podoba konfigurace SIP protokolu. Nejdříve nadefinujeme jakým plánem se bude konfigurace řídit, následně povolíme tónovou volbu. V případě správného nastavení kodeků nejdříve všechny zakážeme a následně povolíme pouze ty, které budou použity. Následně je nutné zvolit transportní protokol. V ukázce není používáno žádné šifrování a jelikož je uvažována pouze lokální síť podpora NAT je také vypnutá. Jednotlivé sekce jsou odděleny názvy sekcí v hranatých závorkách. V kódu 4.2 je vidět konfigurace klienta 1001, který se bude přihlašovat k ústředně protokolem SIP. V této části nastavujeme vlastnosti a možnosti přihlášení k ústředně, konkrétně možnost přihlášení z libovolné IP adresy, přihlašovací jméno, heslo, číslo účastníka a jeho jméno zobrazované protější straně.

Poslední soubor, který je nutný pro základní spuštění Asterisku s podporou SIP protokolu je `extension.conf`. Tento soubor má za úkol definovat jednotlivé kontexty pro volání a příchozí hovory, které jsou nadefinovány v souboru `sip.conf`. V našem případě je potřeba definovat kontext typu `local`, který vyplývá z konfiguračního souboru na obrázku 4.2. Na obrázku 4.3 je část konfiguračního souboru `extensions.conf`. V

kontextu *local* jsou nakonfigurované jednotlivé akce pro konkrétní telefonní čísla. Zápis jde obecně zjednodušit zástupnými znaky například v případě, kdy je potřeba specifikovat povolené formáty telefonních čísel pro odchozí volání. Zápis se provádí ve formátu *exten => číslo, priorita, příkaz(parametry ..)*. Při zadávání priority lze použít parametr *n*, který znamená následující prioritu. Z kódu 4.3 vyplývá, že při vytočení čísla 1001 dojde k vyzvánění na uživatele 1001, po 30 vteřinách, kdy nedojde ke spojení se přehraje hláška o nedostupnosti a ukončí se spojení. Naopak při volbě čísla 200 se ihned hovor spojí a přehraje do sluchátka (RTP stream) předem nahraný zvukový záznam. U čísla 100 je podobný příklad, s tím rozdílem, že se uživateli přehraje echo režim a má možnost mluvit a následně si přehrát mluvený záznam pro kontrolu správné konfigurace.

```
[general]

[local]
;SIP uživatelé
exten => 1001,1,Dial(SIP/1001,30)
exten => 1001,n,Playback(vm-nobodyavail)
exten => 1001,n,Hangup()

exten => 200,1,Answer()
exten => 200,n,Playback(tt-monty-knights)
exten => 200,n,Hangup()

exten => 100,1,Answer()
exten => 100,n,Playback(welcome)
exten => 100,n,Playback(demo-echotest)
exten => 100,n,Echo()
exten => 100,n,Playback(demo-echodone)
exten => 100,n,Playback(vm-goodbye)
```

Ukázka kódu 4.3: Konfigurační soubor extensions.conf

Pro spuštění konzole Asterisků je zapotřebí oprávnění správce a následně použití příkazu `asterisk -rvv`, čím více je zadáno písmen *v*, tím je během správy ústředny vypisováno více detailů o chodu ústředny. Více informací ohledně využití Asterisk konzole je zmíněno v příloze této práce, případně v dokumentaci Asterisků. [15]

5 Testovací software

V rámci testování protokolu SIP a výkonnosti ústředny existuje celá řada programů, která se na tuto problematiku zaměřuje. Z pohledu jednoduchosti ovládání a jednoduché implementace bude v této práci zmíněn pouze software, který je schopen spolupracovat napříč platformami a zároveň lze nastavit veškeré požadované parametry pro výkonnostní testy. Výběr těchto softwarů byl na základě možnosti použití a licenčních podmínek. Pro simulaci SIP provozu bude využit analyzační nástroj SIPp, zároveň při simulaci bude generován souvislý datový tok pomocí programu iPerf. Pro ověření a získání přehledu o přenosu médií bude využit pro analýzu již získaných výsledků s programem SIPp program SIP Tester od společnosti StarTrinity.

5.1 SIPp

SIPp je výkonný testovací nástroj pro ověření SIP protokolu. V základním režimu obsahuje předpřipravené testovací scénáře pro simulaci klienta i serveru. Nástroj vytváří pomocí metod INVITE a BYE hovory a je schopen vytvořit více hovorů zároveň a umožnit i podporu přenosu médií. Testovací scénáře se dají vytvářet pomocí XML souborů, které umožňují libovolné konfigurace pro testování výkonnosti. Zároveň za pomoci *CSV* souboru lze vkládat doplňující data pro simulaci, jako například uživatele. Program je šířen pod licencí GNU a je podporována komunitou od firmy HP. V současné době byla vydána verze SIPp 3.5.1. Tato verze bude použita v praktické části této práce.

SIPp je dostupný pro operační systémy Linux a v případě Windows, lze program spouštět v prostředí Cygwin. Program má jednoduché ovládání a přehledné konfigurační soubory. Při vývoji byl využit programovací jazyk C++ a tím získal velkou oblibu mezi uživatelskou komunitou a je možné si upravit a vylepšit zdrojové kódy. SIPp může být použit pro testování SIP Proxy, B2BUA, SIP media serverů, SIP gateway a SIP pobočkových ústředí. Tímto softwarem lze velmi snadno emulovat tisíce volání skrz testovaný SIP systém. SIPp umožňuje podporu TLS, PCAP play a SCTP.[16]

Na obrázku 5.1 je vidět ovládací prostředí po spuštění testovacího scénáře SIP provozu. Ve výpisu v příkazové řádce jsou viděny aktuálně běžící hovory, počet uskutečněných a aktivních hovorů, statistiky odeslaných RTP paketů a další. Zároveň je zobrazen průběh SIP zpráv dle testovacího scénáře, který je navržen pomocí *XML* souboru. Dále je možné v průběhu měnit počet souběžných hovorů a tím zvyšovat nároky na výpočetní výkon ústředny.

Výsledky simulace jsou vyobrazeny na obrázku 5.2. Obsahuje shrnutí statistických dat, čas simulace, počet vytvořených volání, počet úspěšných a neúspěšných volání, délku hovoru a další parametry.

```

----- Scenario Screen ----- [1-9]: Change Screen --
  Call-rate(length)  Port  Total-time  Total-calls  Remote-host
10.0(100 ms)/1.000s  5060    57.15 s      205  192.168.1.13:5060(UDP)

  10 new calls during 1.002 s period      1 ms scheduler resolution
  29 calls (limit 30)                      Peak was 30 calls, after 3 s
  0 Running, 147 Paused, 28 Woken up
  0 dead call msg (discarded)             0 out-of-call msg (discarded)
  3 open sockets
  43530 Total RTP pkts sent                168.756 last period RTP rate (kB/s)

      Messages  Retrans  Timeout  Unexpected-Msg
INVITE ----->      205      0        0           0
  100 <-----      205      0        0           0
  180 <-----      0        0        0           0
  200 <----- E-RTD1 205      0        0           0

  ACK ----->      205      0
    [ NOP ]
  Pause [ 8000ms]      205
  Pause [ 1000ms]     180
  BYE ----->      176      0        0           0
  200 <-----      176      0        0           0

----- [+|-|*/|/]: Adjust rate ---- [q]: Soft exit ---- [p]: Pause traffic -----

```

Obrázek 5.1: Průběh testování SIPp - průběžné statistiky.

```

----- Test Terminated -----

----- Statistics Screen ----- [1-9]: Change Screen --
Start Time          | 2016-03-21  15:51:40.589846  1458571900.589846
Last Reset Time     | 2016-03-21  15:52:56.315569  1458571976.315569
Current Time        | 2016-03-21  15:52:56.318210  1458571976.318210
-----+-----+-----
Counter Name        | Periodic value          | Cumulative value
-----+-----+-----
Elapsed Time        | 00:00:00:002000        | 00:01:15:728000
Call Rate           | 0.000 cps               | 3.169 cps
-----+-----+-----
Incoming call created | 0                       | 0
OutGoing call created | 0                       | 240
Total Call created   | 0                       | 240
Current Call         | 0                       |
-----+-----+-----
Successful call      | 0                       | 240
Failed call          | 0                       | 0
-----+-----+-----
Response Time 1     | 00:00:00:000000        | 00:00:00:011000
Call Length         | 00:00:00:000000        | 00:00:09:021000
-----+-----+-----
----- Test Terminated -----

```

Obrázek 5.2: Výsledky simulace SIPp.

5.1.1 Instalace SIPp

Před instalací nástroje SIPp je zapotřebí nejprve nainstalovat podpůrné knihovny, které jsou potřeba pro správnou funkci a běh programu. Následující postup instalace je uveden pro linuxovou distribuci Debian verze 8. Nejprve je potřeba doinstalovat kompilátor jazyk C, ncurses knihovnu a knihovny pro podporu médií libpcap a libnet.

```

# apt-get install build-essential
# apt-get install libncurses5-dev
# apt-get install libpcap-dev
# apt-get install libnet-dev

```

Ukázka kódu 5.1: Instalace podpůrných knihoven pro program SIPp

Po doinstalování potřebných knihoven již jen stačí stáhnout nejnovější stabilní verzi programu SIPp. Nyní je nutné pomocí terminálu program zkompileovat. Pro účely této diplomové práce bude postačovat podpora PCAP play, pro přehrávání předehraných nahrávek. SIPp ve výchozí konfiguraci podporuje kodek G.711 A-zákon.

```
# tar -xvzf sipp-3.5.1.tar.gz
# cd sipp-3.5.1
# ./configure --with-pcap
# make
```

Ukázka kódu 5.2: Instalace programu SIPp

5.1.2 Vytvoření testovacích scénářů

Testovací scénáře jsou vytvářeny pomocí *XML* souborů a následně volány pomocí příkazu programu. *XML* soubor má předem danou strukturu a struktura je velmi podobná struktuře SIP zpráv a tím je uživatelsky snadná na konfiguraci. Dle dokumentace programu SIPp je možné vytvořit libovolný scénář testování.

SIPp	UAC	Remote
(1) INVITE		Zahájení volání
----->		
(2) 100 (optional)		Odpověď ústředny o přijetí, volitelná položka
<-----		
(3) 180 (optional)		Zpráva od ústředny o vyzvánění volaného
<-----		
(4) 200		Zvednutí hovoru, zpráva 200
<-----		
(5) ACK		Potvrzení přijmu hovoru druhé straně.
<-----		
(6) RTP send (8s)		Přenášovaná média, přehrání souboru 8s
=====		
(7) BYE		Ukončení spojení - zavěšení sluchátka
<-----		
(8) 200		Potvrzení zavěšení
<-----		

Obrázek 5.3: Průběh signalizace scénáře SIPp UAC s médii [16]

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<!DOCTYPE scenario SYSTEM "sipp.dtd">
<scenario name="UAC with media">
<send retrans="500">
<![CDATA[
  INVITE sip:[service]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
  Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
  From: sipp <sip:sipp@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
  To: sut <sip:[service]@[remote_ip]:[remote_port]>
  Call-ID: [call_id]
  CSeq: 1 INVITE
  Contact: sip:sipp@[local_ip]:[local_port]
  Max-Forwards: 70
  Subject: Performance Test
  Content-Type: application/sdp
  Content-Length: [len]
  . ]]>
</send>
<recv response="100" optional="true">
</recv>
<recv response="180" optional="true">
</recv>
```

Ukázka kódu 5.3: Konfigurace XML scénáře [16]

Na obrázku 5.3 je průběh signalizace SIP protokolu pro scénář s přenosem médií. V ukázce 5.3 konfigurace tohoto scénáře je první část SIP signalizace. Veškeré údaje, které jsou v hranatých závorkách jsou konfigurovatelné a volají se příkazem při spuštění scénáře jako je znázorněno na ukázce 5.4. Parametry, které nejsou volány při spuštění jsou automaticky doplněny výchozími hodnotami. Při vytváření scénáře se zadávají příkazy *send* a *recv*, které určují jestli půjde o vyslání zprávy nebo pouze o příjem. Na obrázku 5.4 je znázorněno spuštění scénáře *uac pcap*. Příkaz zároveň definuje výchozí lokální IP adresu (*i*), délku jednotlivých volání (*d*), testovací scénář (*sf*), číslo volaného (*s*), IP adresu vzdáleného hosta (ústředny) a maximální počet souběžných volání (*l*).

```
#!/sipp -trace_err -i 192.168.1.8 -sf uac_pcap.xml -d 100 -s 111 192.168.1.13 -l 1000
```

Ukázka kódu 5.4: Příkaz pro spuštění SIPp

Při spuštěném scénáři lze pomocí vybraných kláves řídit aktuální vytížení a zvyšovat případně snižovat počet hovorů. Dále je možné přepínat mezi jednotlivými obrazovkami, které zobrazují konkrétní výsledky. Více o možné konfiguraci lze najít v dokumentaci výrobce.[16]

5.2 iPerf

iPerf je program pro analýzu síťových transportních protokolů TCP a UDP. Prostřednictvím tohoto programu lze analyzovat maximální možnou šířku pásma pro přenos mezi dvěma uzly v síti. Program funguje na principu klient - server a je tedy nutné aby byl spuštěn na obou koncových bodech měřené sítě. V našem případě bude zde spuštěn na ústředně v režimu server, tedy bude pouze odpovídat na příchozí požadavky. Na jednom z notebooků bude spuštěn v módu klient a bude tedy generovat zátěž pro ústřednu. Hlavním důvodem implementace v těchto testech je vytvoření reálného prostředí, kdy ústředna bude vystavena okolnímu síťovému provozu a tedy bude muset reagovat i na jiné požadavky než jen požadavky protokolu SIP. iPerf podporuje většinu platforem, tedy Linux, Mac OS X, MS Windows, Android, iOS a další. Pro základní spuštění stačí pouze dva jednoduché příkazy:

```
#iperf -s // server
#iperf -c adresa_serveru -i 1 -t 20 // klient
```

Ukázka kódu 5.5: Spuštění programu iPerf

Příkazem s parametrem *c* nastavíme do módu klient, zadáme adresu serveru a interval, jak často se budou vypisovat statistiky a dobu běhu programu, v tomto případě výpis každou vteřinu po dobu 20 vteřin. Samozřejmě je možné nastavit mnoho dalších parametrů, jako například protokol UDP, TCP, velikost TCP okna, komunikační port, parametr TTL a další.

```

-----
Client connecting to 192.168.1.13, TCP port 5001
TCP window size: 129 KByte (default)
-----
[ 4] local 192.168.1.3 port 56768 connected with 192.168.1.13 port 5001
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.0- 1.0 sec  11.6 MBytes   97.5 Mb/s
[ 4] 1.0- 2.0 sec  11.6 MBytes   97.5 Mb/s
[ 4] 2.0- 3.0 sec  11.2 MBytes   94.4 Mb/s
[ 4] 3.0- 4.0 sec  11.2 MBytes   94.4 Mb/s
[ 4] 4.0- 5.0 sec  11.1 MBytes   93.3 Mb/s
[ 4] 0.0- 5.0 sec  57.0 MBytes   95.6 Mb/s

```

Obrázek 5.4: Ukázka výpisu programu iPerf

5.3 SIP Tester

Testovací software od společnosti StarTrinity umožňuje komplexní sledování statistik o jednotlivých volání včetně analýzy zpoždění paketů. Oproti open-source platformě SIPp tento nástroj je schopen analyzovat veškerá zpoždění přenášených médií a tím rozpoznat kvalitu jednotlivých volání. V základním režimu lze za pomoci nástrojů analyzovat REGISTER zprávy a následně vytvářet odchozí volání a odpovídat na příchozí volání. Nástroj pracuje na podobném principu jako SIPp. Je tedy zapotřebí připravit testovací scénáře v *XML* souborech. Výhodou oproti SIPp je možnost práce v grafickém režimu a zobrazování získaných výsledků v přehledných tabulkách a grafech. Tento nástroj je pro výkonnostní testy velkých systémů a tvůrci uvádějí, možnost vytvářet až 8000 současných hovorů pro jeden server v konfiguraci čtyřjádrového procesoru Intel i7-3700. Software je dostupný freeware v omezené licenci pro maximálně 50 současných hovorů a maximálně 150 vygenerovaných SIP instancí. Tato omezená licence by měla být dostačující pro prokázání získaných výsledků z testů v programu SIPp. Program je dostupný pouze pro platformu MS Windows. [17]

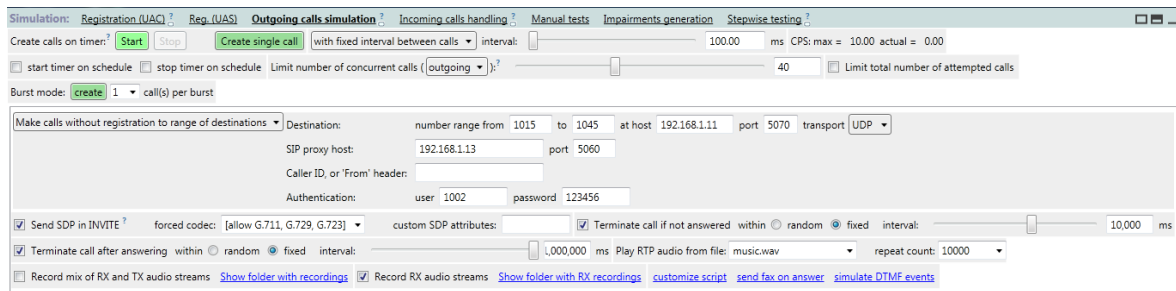
The screenshot shows the StarTrinity SIP Tester application window. At the top, there are several tabs: 'Reports', 'Current calls - SIP info', 'Current calls - RTP info', 'Calls history (CDR)', 'Lowest quality calls', 'Reports/Statistics', 'Performance chart', 'Log', and 'Stepwise testing'. Below the tabs is a table with columns for various call metrics. The table contains 42 rows of data, each representing a call instance. The columns include: Direction/CallerID/CalledID, RTP stream, Codec, Caller SSRC, Caller G107R, Caller G107MOS, Caller lost packets, Caller max RFC3550 jitter, Caller mean RFC3550 jitter, Caller min/max delta, and Caller ms. The data is color-coded, with green indicating good performance and red indicating issues. At the bottom of the window, there is a status bar showing 'Current calls: 42', 'Abort All', 'A: 40 R: 2 AD: j:', 'CPU: 24%', 'Version: 2016-04-22 21:07 UTC', 'update', 'Licensed to: [freeware] license information', 'Help/support', 'Settings', 'Web interface', and 'misc'.

Direction/CallerID/CalledID	RTP stream	Codec	Caller SSRC	Caller G107R	Caller G107MOS	Caller lost packets	Caller max RFC3550 jitter	Caller mean RFC3550 jitter	Caller min/max delta	Caller ms
out/1002/1041	192.168.1.5:16024->192.168.1.13:26926	G711A	0x79EC14CD	93.2	4.41	0/(2672+0) (0.00%)	3.30ms	0.19ms	0.05/48.28ms	28.28ms
out/1002/1023	192.168.1.5:16028->192.168.1.13:12006	G711A	0x43C35ADD	93.2	4.41	0/(2666+0) (0.00%)	2.39ms	0.22ms	1.57/38.42ms	18.43ms
out/1002/1016	192.168.1.5:16028->192.168.1.13:22182	G711A	0x71A975FF	93.2	4.41	0/(2662+0) (0.00%)	3.87ms	0.18ms	0.07/52.95ms	32.95ms
out/1002/1037	192.168.1.5:16030->192.168.1.13:9802	G711A	0x68A75718	93.2	4.41	0/(2657+0) (0.00%)	3.42ms	0.19ms	0.06/48.78ms	28.78ms
out/1002/1026	192.168.1.5:16032->192.168.1.13:16346	G711A	0x01C31319	93.2	4.41	0/(2653+0) (0.00%)	3.36ms	0.19ms	0.07/48.34ms	28.34ms
out/1002/1016	192.168.1.5:16034->192.168.1.13:27264	G711A	0x0A0762E1	93.2	4.41	0/(2648+0) (0.00%)	3.33ms	0.22ms	0.06/48.31ms	28.31ms
out/1002/1016	192.168.1.5:16036->192.168.1.13:11214	G711A	0x42782358	93.2	4.41	0/(2643+0) (0.00%)	3.98ms	0.21ms	0.06/53.12ms	33.12ms
out/1002/1021	192.168.1.5:16038->192.168.1.13:30574	G711A	0x60265570	93.2	4.41	0/(2638+0) (0.00%)	3.33ms	0.18ms	0.06/48.53ms	28.53ms
out/1002/1015	192.168.1.5:16040->192.168.1.13:13260	G711A	0x0C101E06	93.2	4.41	0/(2633+0) (0.00%)	3.30ms	0.20ms	0.07/48.20ms	28.20ms
in/1002/1015	192.168.1.13:10004->192.168.1.5:16042	G711A	0x0C101E06	93.2	4.41	0/(373+0) (0.00%)	1.91ms	0.95ms	12.64/26.59ms	7.36ms
out/1002/1036	192.168.1.5:16044->192.168.1.13:24730	G711A	0x76C23A59	93.2	4.41	0/(2627+0) (0.00%)	3.94ms	0.19ms	0.05/52.95ms	32.95ms
out/1002/1041	192.168.1.5:16046->192.168.1.13:22528	G711A	0x489A08E5	93.2	4.41	0/(2623+0) (0.00%)	3.36ms	0.17ms	0.06/48.68ms	28.68ms
out/1002/1027	192.168.1.5:16048->192.168.1.13:27206	G711A	0x5AD16F94	93.2	4.41	0/(2617+0) (0.00%)	2.41ms	0.20ms	1.61/38.35ms	18.39ms
out/1002/1041	192.168.1.5:16050->192.168.1.13:24838	G711A	0x11703E4D	93.2	4.41	0/(2613+0) (0.00%)	3.39ms	0.23ms	0.09/48.08ms	28.08ms
out/1002/1043	192.168.1.5:16052->192.168.1.13:26604	G711A	0x507074F7	93.2	4.41	0/(2607+0) (0.00%)	2.72ms	0.19ms	0.04/43.02ms	23.02ms
out/1002/1029	192.168.1.5:16054->192.168.1.13:10618	G711A	0x6003347C	93.2	4.41	0/(2603+0) (0.00%)	3.38ms	0.18ms	0.05/48.56ms	28.56ms
out/1002/1025	192.168.1.5:16056->192.168.1.13:5292	G711A	0x300741C3	93.2	4.41	0/(2598+0) (0.00%)	3.29ms	0.18ms	0.05/48.27ms	28.27ms
out/1002/1018	192.168.1.5:16058->192.168.1.13:24938	G711A	0x56930584	93.2	4.41	0/(2592+0) (0.00%)	3.44ms	0.22ms	0.05/48.32ms	28.32ms
out/1002/1037	192.168.1.5:16060->192.168.1.13:26172	G711A	0x11AE0D37	93.2	4.41	0/(2588+0) (0.00%)	3.87ms	0.17ms	0.05/52.97ms	32.97ms
out/1002/1035	192.168.1.5:16062->192.168.1.13:16572	G711A	0x06610934	93.2	4.41	0/(2582+0) (0.00%)	2.42ms	0.18ms	1.05/38.78ms	18.95ms
out/1002/1030	192.168.1.5:16064->192.168.1.13:6214	G711A	0x4DB34E93	93.2	4.41	0/(2578+0) (0.00%)	3.36ms	0.18ms	0.06/48.35ms	28.35ms
out/1002/1036	192.168.1.5:16066->192.168.1.13:20884	G711A	0x74AC563C	93.2	4.41	0/(2573+0) (0.00%)	3.33ms	0.22ms	0.06/48.31ms	28.31ms
out/1002/1045	192.168.1.5:16068->192.168.1.13:10476	G711A	0x7C5A3D18	93.2	4.41	0/(2567+0) (0.00%)	2.80ms	0.20ms	0.07/43.15ms	23.15ms
out/1002/1016	192.168.1.5:16070->192.168.1.13:12464	G711A	0x52A75B18	93.2	4.41	0/(2558+0) (0.00%)	2.30ms	0.20ms	1.78/38.19ms	18.22ms
out/1002/1045	192.168.1.5:16072->192.168.1.13:23580	G711A	0x75D35004	93.2	4.41	0/(2557+0) (0.00%)	2.80ms	0.20ms	0.07/43.15ms	23.15ms
out/1002/1028	192.168.1.5:16074->192.168.1.13:19828	G711A	0x2DB969E6	93.2	4.41	0/(2553+0) (0.00%)	3.35ms	0.20ms	0.06/48.15ms	28.45ms
out/1002/1031	192.168.1.5:16076->192.168.1.13:20296	G711A	0x526F3E99	93.2	4.41	0/(2548+0) (0.00%)	2.70ms	0.21ms	0.06/43.06ms	23.06ms
out/1002/1042	192.168.1.5:16078->192.168.1.13:9306	G711A	0x28FC1F07	93.2	4.41	0/(2543+0) (0.00%)	2.41ms	0.16ms	0.27/38.70ms	19.73ms
out/1002/1033	192.168.1.5:16080->192.168.1.13:9722	G711A	0x6A680016	93.2	4.41	0/(2539+0) (0.00%)	3.35ms	0.19ms	0.06/48.33ms	28.33ms
out/1002/1042	192.168.1.5:16082->192.168.1.13:8850	G711A	0x438C7A80	93.2	4.41	0/(2533+0) (0.00%)	2.41ms	0.20ms	1.75/38.13ms	18.25ms

Obrázek 5.5: Ukázka výpisu současných hovorů v programu SIP Tester - přehled RTP

Nastavení generování odchozích volání probíhá zjednodušeně za pomoci grafického prostředí znázorněném na obrázku 5.6. Volání je generováno jedním uživatelem (1002)

a volá v rozmezí 1015 až 1045. V nastavení je dále možné upravit podporované kodeky, případně zakázat média úplně, délku hovoru a také je možné nahrávat záznam hovorů.



Obrázek 5.6: Nastavení odchozích hovorů v programu SIP Tester

6 Metodika testování

Testování vestavěných systémů bude realizováno v několika fázích a vyhodnocováno na základě získaných statistických dat simulací a testů při zatížení softwarové ústředny. Ústředna bude nainstalována ve stejné konfiguraci, aby byly výsledky co nejvíce porovnatelné. Jednotlivé testy budou opakovány pro dosažení přesnějších výsledků a odstranění náhodných veličin. Testy budou realizovány v různých scénářích, aby bylo možné komplexně porovnat výkonnostní parametry vestavěného systému. Testy proběhnou na dvou notebookech, které budou simulovat telefonní provoz na protokolu SIP a přenášet média pomocí protokolu RTP. Celé simulace budou vytvářeny pomocí simulačního programu SIPp. Na jedné straně bude notebook v režimu UAC, kdy bude vytvářet a generovat volání a druhý notebook v režimu UAS, který bude na volání odpovídat.

6.1 Registrace telefonních přístrojů

Prvním testovacím scénářem bude zaregistrování k telefonní ústředně. Nejdříve dojde k vygenerování zprávy REGISTER a následně ústředna odpoví metodou 401 Unauthorized. Po obdržení se opět vygeneruje zpráva REGISTER, ale je doplněna o hash v kterém je spočtené přihlašovací jméno a heslo a autorizační kód, který byl obdrženo od ústředny ve zprávě 401.

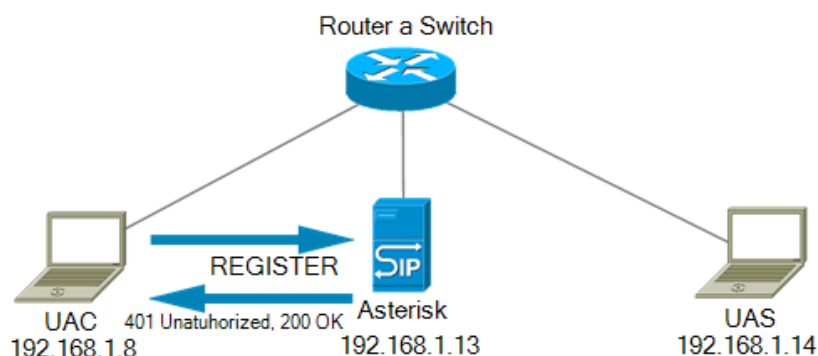
```

| (1) REGISTER          |
|----->|
| (2) 100 (optional)   |
|<-----|
| (3) 401 Unauthorized |
|<-----|
| (4) REGISTER          |
|----->|
| (5) 200 OK           |
|<-----|

```

Obrázek 6.1: Průběh signalizačních zpráv registrace telefonních přístrojů k ústředně

Celý průběh scénáře je naznačen na schématu 6.1. Jak je patrné ze schématu simulace pro tyto testy bude postačovat jeden notebook a ústředna. Testy budou probíhat na počátečním generování 5 zpráv za vteřinu a každé 2 vteřiny dojde k navýšení o 2 zprávy za vteřinu. Test bude probíhat do té doby než dojde k zablokování ústředny a přestane odpovídat na výzvy k registraci. K ústředně se bude přihlašovat 15 uživatelů. Uživatelé bude tvořit jedna instance scénáře SIPp a údaje budou získávány z předkonfigurovaného CSV souboru. Testovací scénář je součástí příloh této práce.



Obrázek 6.2: Schéma zapojení testu registrace telefonních přístrojů

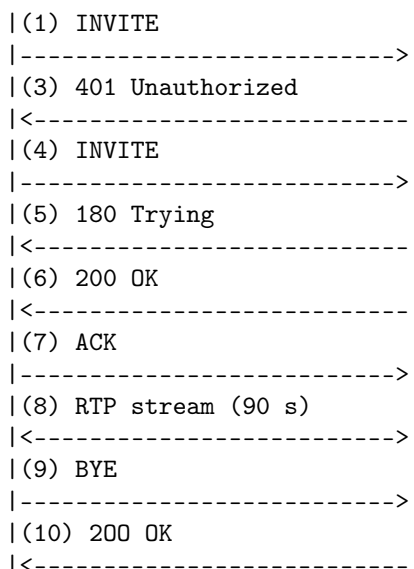
Schéma zapojení registrace telefonních přístrojů je znázorněno na obrázku 6.2. Na notebooku, který bude generovat žádosti o registraci bude spuštěn SIPp s vlastním scénářem pro registraci k ústředně. Veškeré potřebné soubory jsou přílohou této práce. Pro spuštění testu je nutné spustit SIPp s následujícími parametry uvedených v příkazu 6.1. Nejdříve je nutné zadefinovat lokální IP adresu pro odesílání žádostí, následně zvolit scénář, CSV soubor s parametry uživatelů, adresu ústředny. Dle požadovaných parametrů počet volání za vteřinu, navýšení počtu volání za vteřinu a nakonec zvolit způsob výpisu statistik. Statistika budou uloženy do souborů pod názvem testovacího scénáře a PID procesu, pod kterým jsou spuštěny.

```
#!/sipp -i 192.168.1.8 -sf reg.xml -inf user_UAC.csv 192.168.1.13 -r 5 -rate_increase 2 -fd 2s -l 1000 -trace_stat -trace_counts -trace_screen -trace_rtt
```

Ukázka kódu 6.1: Spuštění testovacího scénáře reg.xml

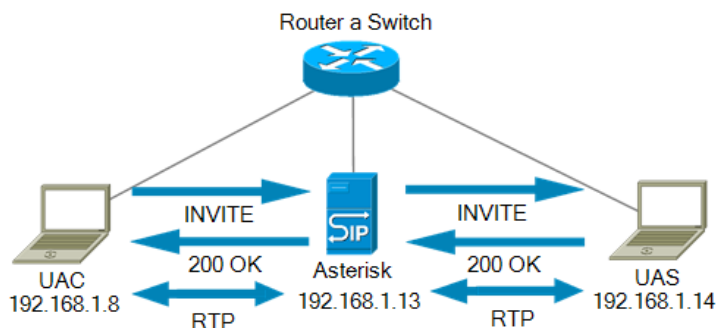
6.2 Simulace hovorů včetně přenosu hlasu

Simulace hovoru bude realizována za pomoci dvou instancí SIPp. Každá instance poběží na jiném zařízení. V jednom případě se bude jednat o režim UAC, tedy generátor vyzývacích zpráv INVITE a v druhém případě bude klient v režimu UAS, tedy pouze odpovídat na příchozí výzvy. Veškerý provoz bude překládán v ústředně a bude tím zatížena. Součástí přenosu po spojení hovoru bude přehrávání předem nahraného zvuku, který bude sloužit pro účely zatížení RTP streamem. Signalizační schéma průběhu simulace je znázorněno na obrázku 6.3. Nejdříve je nutné se vůči ústředně autorizovat, tedy musí se poslat zpráva INVITE dvakrát, jednou doplněná o přihlašovací údaje. Následně odpoví ústředna zprávou Trying a čeká na "zvednutí sluchátka" na protější straně. Zde dojde simulacním programem k odpovědi 200 OK a tím je vytvořeno spojení, poté ještě volající strana potvrdí zprávou ACK. Nyní je nastavena pauza na 90 vteřin a tím dojde k odeslání předem nahraných nahrávek a získání přenášených médií.



Obrázek 6.3: Schéma signalizace hovoru s médii

V tomto testovacím scénáři jsou média nastaveny tak, že veškeré přenosy hlasu odbavuje ústředna a posílá je koncovým uživatelům a tedy je tímto přenosem velmi zatěžována. Tato modelová situace je vhodná pro případ, že budeme požadovat nahrávání jednotlivých hovorů.



Obrázek 6.4: Schéma zapojení testu hovorů včetně přenosu hlasu

Pro realizaci simulací jsou opět vytvořeny jednotlivé scénáře a jsou přílohou této práce. Pro klienty UAC a UAS je vždy jiný scénář a využívají i jiné seznamy připojených uživatelů. Před samotným spuštěním celé simulace je nutné na straně UAS zaregistrovat volané pomocí scénáře uvedeného v kapitole 6.1. Aby nemuseli být puštěné dvě instance programu SIPp je nastavena doba expirace u zprávy REGISTER na 3 600 vteřin, tedy 1 hodinu.

Spuštění simulace provedeme nejdříve zaregistrováním klientů na straně UAS pomocí příkazu na ukázce kódu 6.2 a po skončení na straně UAS pustíme skript dle kódu 6.3. Nyní jen stačí pustit SIPp i na straně UAC dle příkazu na ukázce 6.4. Měření opět

bude navyšováno jako v případě registrace, tedy počáteční stav 0,5 hovorů za vteřinu se bude každých 50 vteřin navyšovat o 1 volání za vteřinu dokud bude ústředna schopna odbavovat hovory.

```
#./sipp -i 192.168.1.14 -sf reg.xml -inf user_UAS.csv -rsa 192.168.1.13 -r 10 -
rate_increase 5 -rate_max 50
```

Ukázka kódu 6.2: Přihlášení klientů na straně UAS pomocí reg.xml

```
#./sipp -i 192.168.1.14 -sf uas_pcap.xml 192.168.1.13 -rsa 192.168.1.13 -trace_stat -
trace_counts -trace_screen -trace_rtt
```

Ukázka kódu 6.3: Spuštění režimu UAS

```
#./sipp -i 192.168.1.8 -sf uac_pcap.xml -inf user_UAC.csv 192.168.1.13 -rsa
192.168.1.13 -r 0.5 -rate_increase 1 -fd 50s -l 100 -trace_stat -trace_counts -
trace_screen -trace_rtt
```

Ukázka kódu 6.4: Spuštění režimu UAC

6.3 Simulace hovorů - přenos pouze signalizace

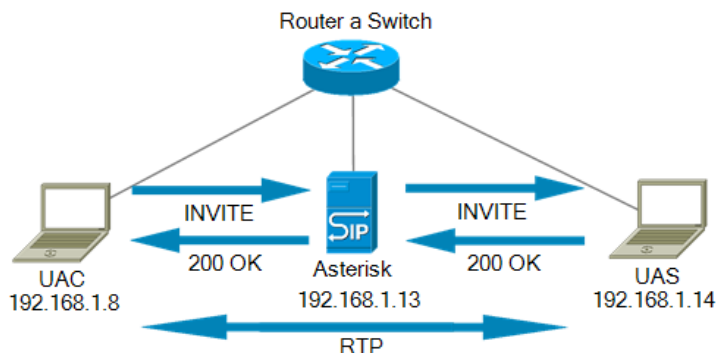
Poslední test ústředny proběhne pouze na základě zpracovávání signalizace. Pro přenos médií bude v tomto scénáři zvolena přímá cesta mezi koncovými body a tím nebude ústředna zatěžována RTP streamem. Průběh signalizačních zpráv je znázorněn na obrázku 6.5.

```
| (1) INVITE |
|----->|
| (3) 401 Unauthorized |
|<-----|
| (4) INVITE |
|----->|
| (5) 180 Trying |
|<-----|
| (6) 200 OK |
|<-----|
| (7) ACK |
|----->|
| (8) Re-INVITE |
|<-----|
| (9) 200 OK |
|----->|
| (10) Re-INVITE |
|<-----|
| (11) 200 OK |
|----->|
| (12) Pause 90s |
| (13) BYE |
|----->|
| (14) 200 OK |
|<-----|
```

Obrázek 6.5: Signalizační schéma průběhu hovoru bez přenosu médií

V průběhu signalizace nejdříve dojde k navázání komunikace pomocí zpráv INVITE následně strana UAS potvrdí přijetí hovoru. Média se v této konfiguraci nebudou

přenášet prostřednictvím ústředny a tedy dojde znovu k zaslání zprávy INVITE, tentokrát od ústředny a v následujícím kroku po zaslání poslední zprávy re-INVITE se média přepnou mezi koncové stanice. Poté dojde k pozastavení hovoru na 90 vteřin a následně se hovor ukončí. Schéma zapojení a naznačení přenosu signalizačních zpráv je znázorněno na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Schéma zapojení testů s přímými médii

Z obrázku 6.6 je patrné, že ústředna bude realizovat pouze spojení pomocí signalizace SIP a média budou přenášena na přímo mezi koncovými zařízeními. Testovací scénář je navržen tak, aby si volající strany za pomoci ústředny domluvily přenos médií napřímo a nedocházelo tak k zatížení ústředny. Po vytvoření hovoru zrealizují přenos audia po dobu 90 vteřin a poté hovor ukončí. Testovací scénáře jsou velmi podobné jako předchozí a jsou přiloženy jako příloha této práce. Spuštění se provede stejným způsobem jako v předchozím bodě, s tím rozdílem že je nutné uvést jiné testovací scénáře XML. Spuštění je naznačeno na ukázce 6.5. Samozřejmě je nutné upravit konfiguraci ústředny Asterisk, aby bylo možné přenášet média přímo mezi koncovými uzly.

```

#./sipp -i 192.168.1.14 -sf reg.xml -inf user_UAS.csv -rsa 192.168.1.13 -r 10 -
rate_increase 5 -rate_max 50

#./sipp -i 192.168.1.14 -sf uas.xml 192.168.1.13 -rsa 192.168.1.13 -trace_stat -
trace_counts -trace_screen -trace_rtt

#./sipp -i 192.168.1.8 -sf uac.xml -inf user_UAC.csv 192.168.1.13 -rsa 192.168.1.13 -
r 1 -rate_increase 1 -fd 90s -trace_stat -trace_counts -trace_screen -trace_rtt -l
1000

```

Ukázka kódu 6.5: Spuštění testovacího scénáře s přímým přenosem médií

6.4 Sledované statistiky

Pro jednotlivé scénáře testování ústředny jsou navrženy časové úseky po kterých bude sledována reakční doba ústředny na jednotlivé zprávy. Výsledkem těchto testů by měla být znázorněna delší reakční doba ústředny při více požadavcích v jednom konkrétním časovém úseku. Následně bude zaznamenáván počet hovorů v čase a celkový počet úspěšných a neúspěšných hovorů. V podrobných statistikách bude zaznamenán jednotlivý počet konkrétních zpráv a počet opakovaných odeslání zpráv. Při běhu testu

budou sledovány systémové statistiky ústředny, jako například vytížení procesoru a využití síťové konektivity.

Při testování bude nejdříve ústředna obsluhovat pouze provoz vzniklý hovory, tedy žádosti SIP a přenos médií prostřednictvím RTP. Poté ve stejné konfiguraci bude ústředna zároveň zatížena TCP tokem vytvářeným pomocí programu iPerf, který je popsán v kapitole 5.2. Testy proběhnou opakovaně pro zajištění přesnějších výsledků. Jedním z faktorů ovlivňujících výkon by také mohl být typ operačního systému. Na testovaných zařízeních bude pro první testy nainstalován operační systém Raspbian. Raspbian vychází z distribuce Debianu a je upraven pro vestavěný systém RaspberryPi. Podporu tohoto operačního systému nabízejí i ostatní platformy vestavěných systémů. Jako druhý operační systém bude zvolena upravená linuxová distribuce Ubuntu. V případě, že na vestavěném systému nebude podpora tohoto systému bude zvolena jiná distribuce pro porovnání výsledků.

7 Testované systémy

V rámci této diplomové práce budou probíhat testy na vestavěných zařízeních, které se podařilo získat pro realizaci těchto testů. Mezi tyto zařízení patří Raspberry Pi 2 Model B, který je popsán v kapitole 2.2 a zařízení Orange Pi PC, které má podobné vlastnosti jako Raspberry Pi, s tím rozdílem, že je vyráběn jiným výrobcem a nabízí jiná specifika, která jsou popsána v kapitole 2.4.1.

Hlavním rozdílem těchto zařízení je typ a výkon procesoru. Raspberry Pi disponuje procesorem Broadcom BCM2836 s základním taktem 0,9 GHz, Orange Pi PC využívá procesor AllWinner H3 s taktem 1,6 GHz. Orange Pi nabízí stejnou síťovou konektivitu jako Raspberry Pi, tedy 100 Mbit/s Ethernet.

Raspberry Pi v testovacích scénářích využívá operační systém Raspbian GNU/Linux 8.0 (jessie) s nainstalovanou softwarovou ústřednou Asterisk verze 13.8.2. Pro účely testování a zatížení síťové komunikace je připraven program iPerf ve verzi 2.0.5. Jako druhý operační systém je připraven operační systém Ubuntu verze 14.04.2 LTS v systému je nainstalována softwarová ústředna Asterisk verze 13.8.2. Jako v předchozím operačním systému i zde je k dispozici program iPerf ve verzi 2.0.5.

Orange Pi Pc podporuje OS Raspbian, ale jeho podpora není stoprocentní, a proto je využit v testech operační systém Debian GNU/Linux 8.0 (jessie) se softwarovou ústřednou Asterisk verze 13.8.2. V tomto případě se jedná o čistou instalaci systému Debian, jádro operačního systému je stejné jako v případě upraveného Raspbianu. Jako druhý operační systém je připraven OS Ubuntu verze 15.04 s ústřednou Asterisk ve stejné verzi, tedy 13.8.2. V těchto systémech již není nainstalován program iPerf, jelikož není využíván pro simulační testy.

Na závěr testování jsou simulace realizovány na podobném zařízení jako jsou vestavěné systémy, s tím rozdílem že je toto zařízení přímo vyráběno jako malá pobočková IP ústředna. Zařízení Grandstream UCM 6102 běží na vlastní platformě (pravděpodobně linuxová distribuce). Dle odchycené komunikace se zdá, že uvnitř je použit jako ústředna software Asterisk. Tyto údaje nejsou výrobcem nikde udávány a nelze je tedy s jistotou určit. Zařízení se nastavuje pomocí vlastního webového rozhraní.

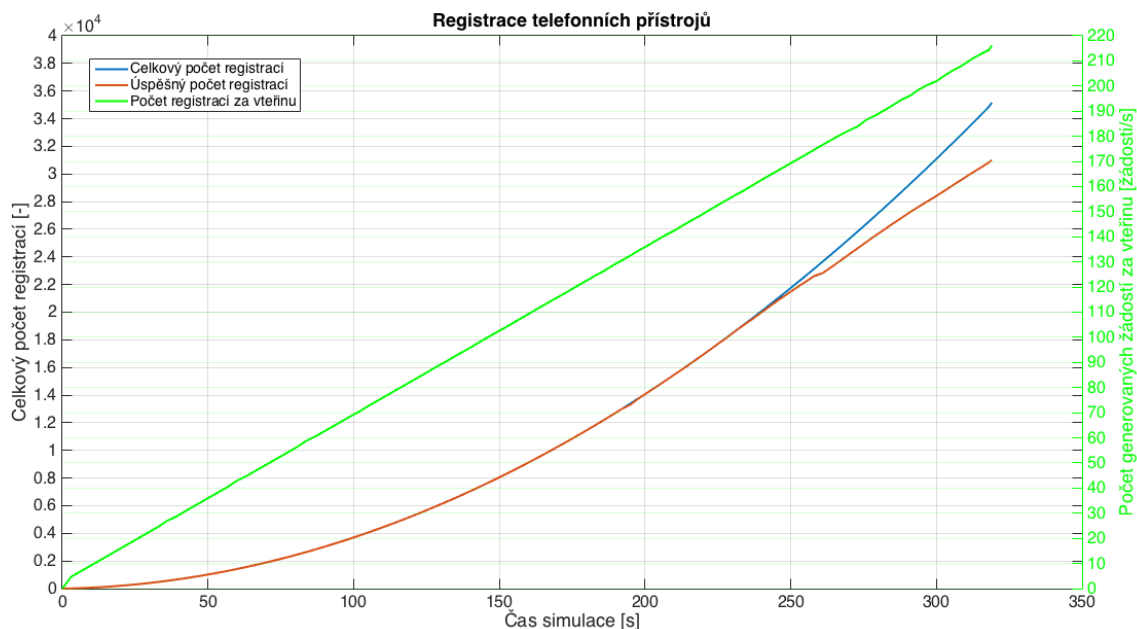
8 Výsledky testů

8.1 Raspberry Pi 2 Model B

Prvním testovaným zařízením je Raspberry Pi 2 Model B, v základní konfiguraci s taktem procesoru 0,9 MHz. Na zařízení je nainstalován operační systém Raspbian a také Ubuntu. Testy probíhaly na obou systémech a rozdíly jsou zaznamenány u jednotlivých scénářů.

8.1.1 Scénář REGISTER

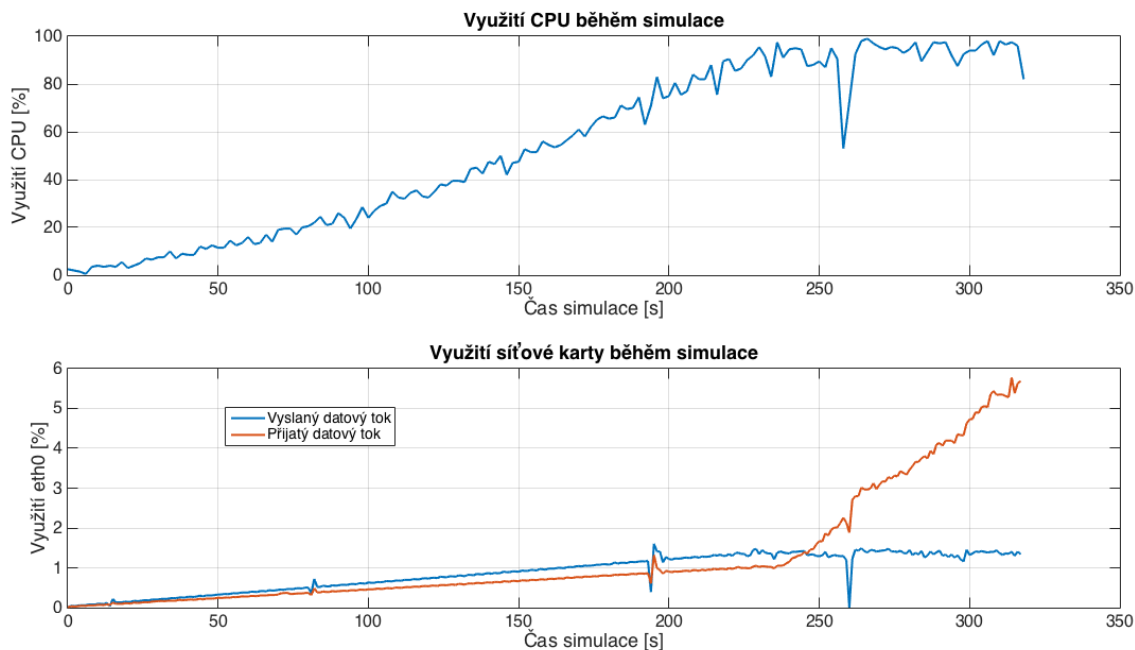
Registrace telefonních přístrojů probíhala podle předem nastaveného scénáře s počátečním generováním 5 žádostí za vteřinu a každé 3 vteřiny se počet žádostí za vteřinu zvýšil o 2 žádosti. Test byl spuštěn s nastaveným limitem maximálně 10000 současných žádostí v systému.



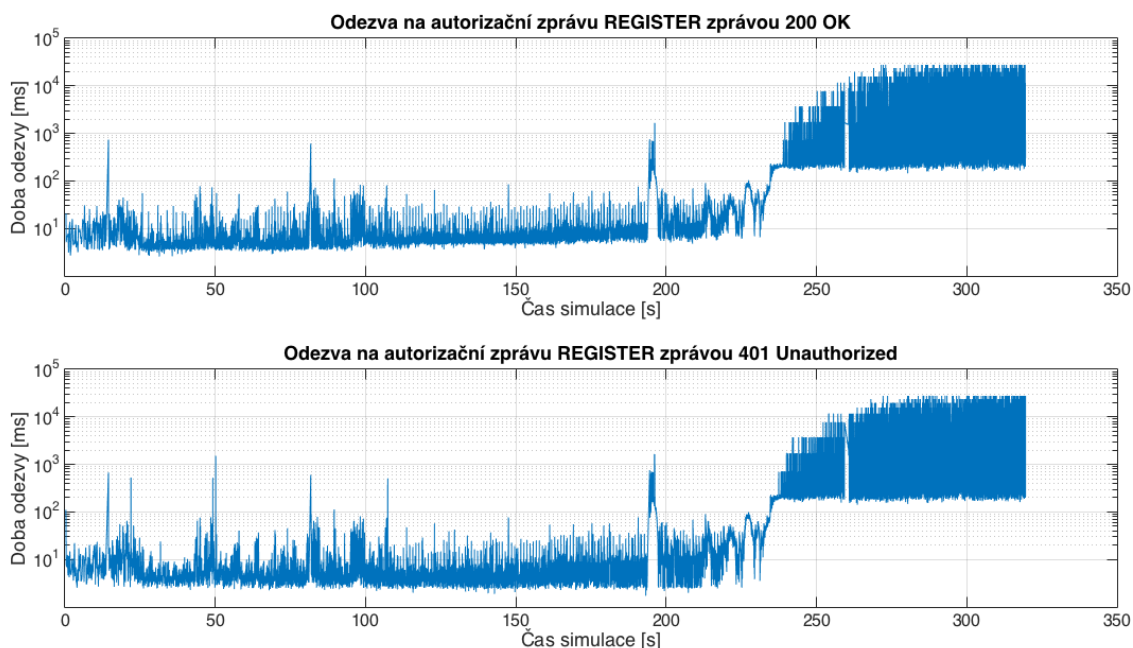
Obrázek 8.1: Registrace klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Ústředna bez problému dokáže vyhovět nejméně 150 žádostem za vteřinu. Z grafu znázorněném na obrázku 8.1 je patrné, že k zahlcení systému, kdy již nezvládá reagovat na generované žádosti dochází v oblasti, kdy je generováno přibližně 160 žádostí za vteřinu. V tomto okamžiku je již odezva systému příliš velká a začíná docházet k výpadkům a vypršení časových limitů pro odpovědi.

Vytíženost celého systému v průběhu simulace je znázorněna v grafech na obrázku 8.2. Využití procesoru se blíží takřka ke 100 procentům v okamžiku, kdy začíná být systém přetížen a zcela zahlcen příchozími požadavky. Ve využití síťové karty jsou velmi dostatečné rezervy. Raspberry Pi 2 Model B disponuje pouze 100 Mbit/s ethernetovou kartou, ale i ta je naprosto dostačující pro zvládnutí maximální kapacity systému.



Obrázek 8.2: Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

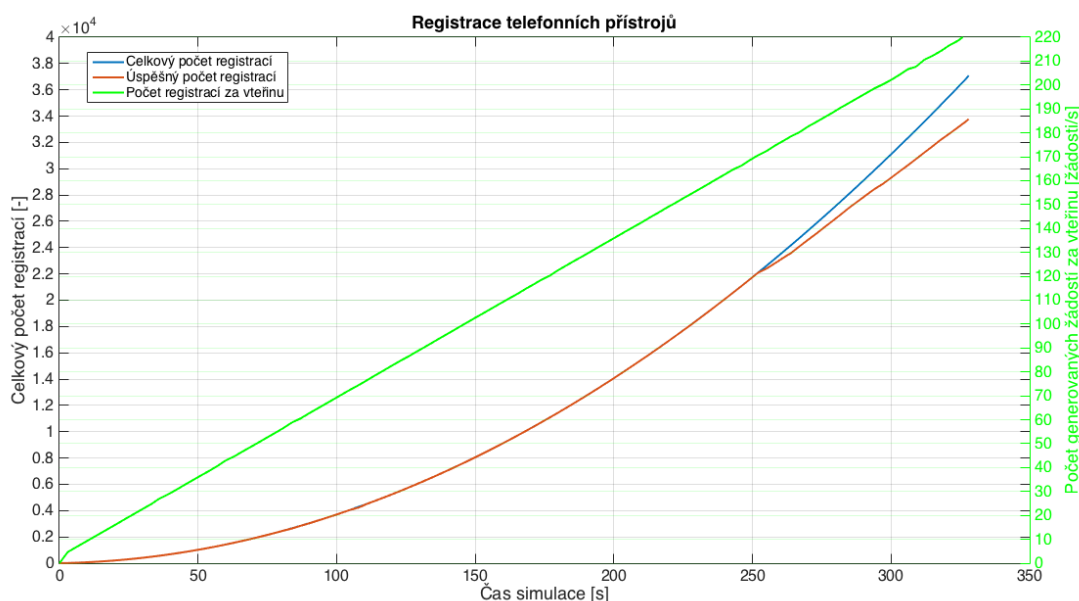


Obrázek 8.3: Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Na grafech na obrázku 8.3 jsou znázorněny průběhy odezvy na zprávy REGISTER. Na horním grafu je odezva na REGISTER zprávu, která již obsahuje autorizační heslo a klíč a ústředna již odpovídá úspěšnou zprávou 200 OK. Na tomto průběhu je patrné, že se zvyšujícím počtem žádostí dochází k delším prodlevám mezi odpověďmi. Po dosažení limitu 160 žádostí za vteřinu se doba odezvy velice zvyšuje a dosahuje až 27 vteřin a

tím dojde k vypršení časového limitu. Na začátku simulace jsou reakční doby okolo 3 ms. Na druhém grafu je vyobrazena odezva na prvotní zprávu REGISTER ústřednou, která odesílá odpověď 401 Unauthorized. Průběhy těchto odezev jsou velmi podobné a k zhoršení doby odezvy dochází přibližně ve stejný okamžik.

Registrace probíhala také v druhé konfiguraci systému Raspberry Pi a to s operačním systémem Ubuntu. Výsledky testů jsou výkonnostně lepší, a tím se zde potvrdil patrný vliv OS na výkonnost ústředny. Z grafu na obrázku 8.4 je patrné, že k nedostupnosti dochází až kolem 170 žádostí za vteřinu a tím dochází k výraznému zvýšení výkonu oproti minulým testům kdy na zařízení byl nainstalován OS Raspbian.



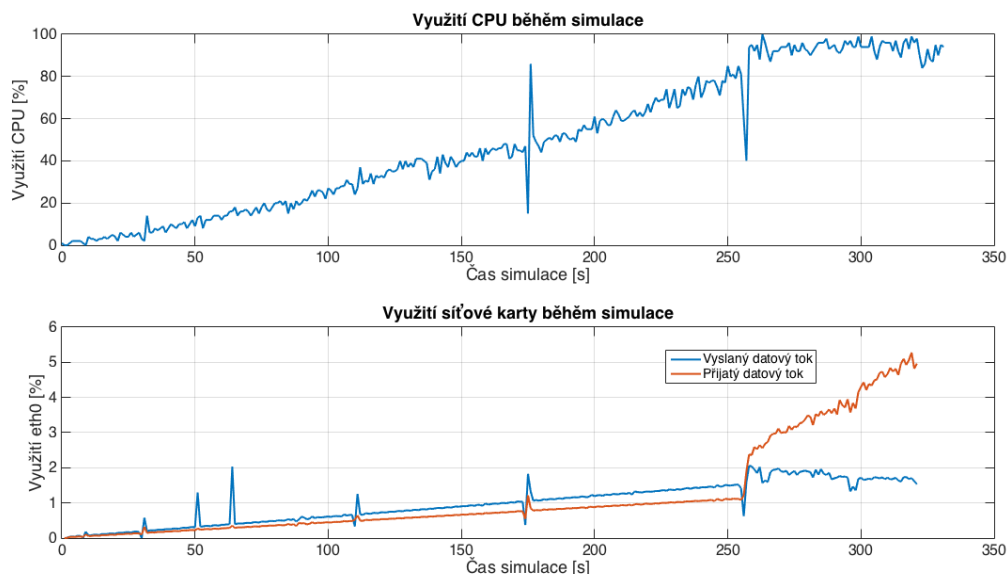
Obrázek 8.4: Registrace klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

V případě OS Ubuntu dochází k lepšímu využití systémových prostředků a procesor je méně zatěžován v průběhu simulace a tím je možné dosáhnout lepších výsledků. Reakční doba je závislá na dostupnosti ústředny a je tedy velmi podobná. V případě plného zatížení dochází k vypršení časového limitu žádostí jak je patrné z grafu na obrázku 8.6. Reakční doba se stejně jako u systému Raspbian pohybuje v řádech jednotek až tisíců milisekund. Pro vhodné zobrazení je zvoleno logaritmické měřítko pro zobrazení reakční odezvy.

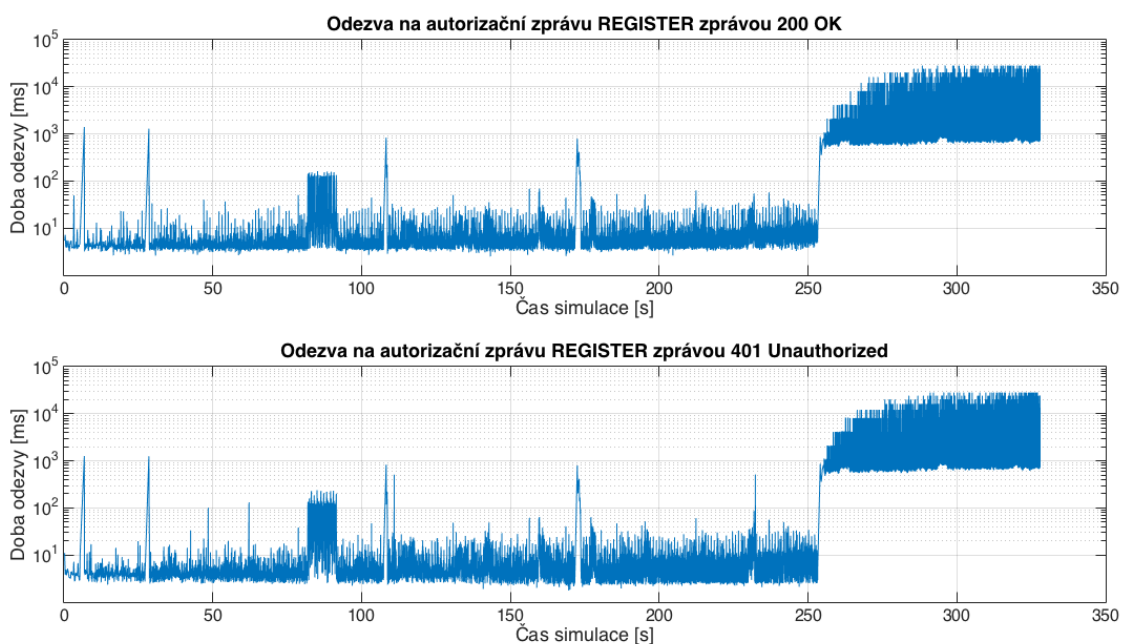
8.1.2 Scénář INVITE s RTP

Generování hovorů probíhá podle předem stanoveného scénáře a je tedy generován 1 hovor za 2 vteřiny a po dosažení 45 současných hovorů je generování navýšeno na 1,5 hovorů za vteřinu. Maximální počet souběžných volání je omezen na 100. Při spuštění simulace jsou zachytávány pakety na straně UAS pro pozdější analýzu přenosu RTP paketů.

Na grafu vyobrazeném na obrázku 8.7 jsou výsledky simulace souběžných hovorů k ústředně v operačním systému Raspbian. K nenavázání spojení dochází v okamžiku,

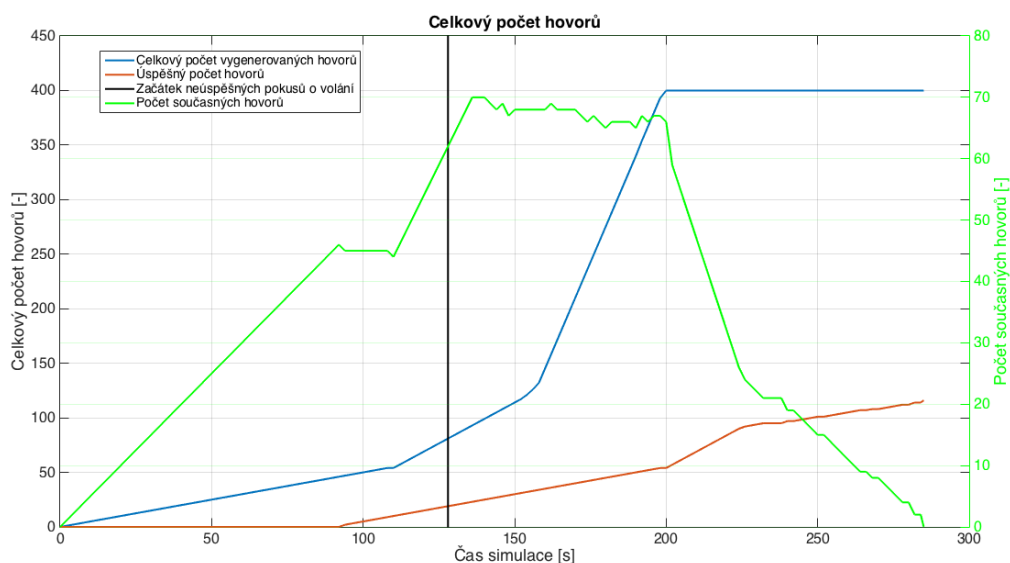


Obrázek 8.5: Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu



Obrázek 8.6: Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

kdy systém odbavuje přes 60 hovorů současně. Po analýze těchto výsledků bylo zrealizováno několik měření pro získání maximální možné hodnoty. Opakovanými měření bylo dosaženo maximálně 65 hovorů současně a při dalším zvýšení již ústředna nebyla schopna požadavek vyřídit. Tato hodnota je hraniční a nelze jí zaručit při reálném zatížení v praxi. Jelikož program SIPp není navržen tak, aby mohl analyzovat kvalitu a zpoždění RTP paketů byla provedena analýza zachycených paketů za pomoci programu Wireshark. RTP pakety byly přijaty, ale u 27 streamů byly pakety zpožděny a tedy



Obrázek 8.7: Simulace souběžných hovorů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

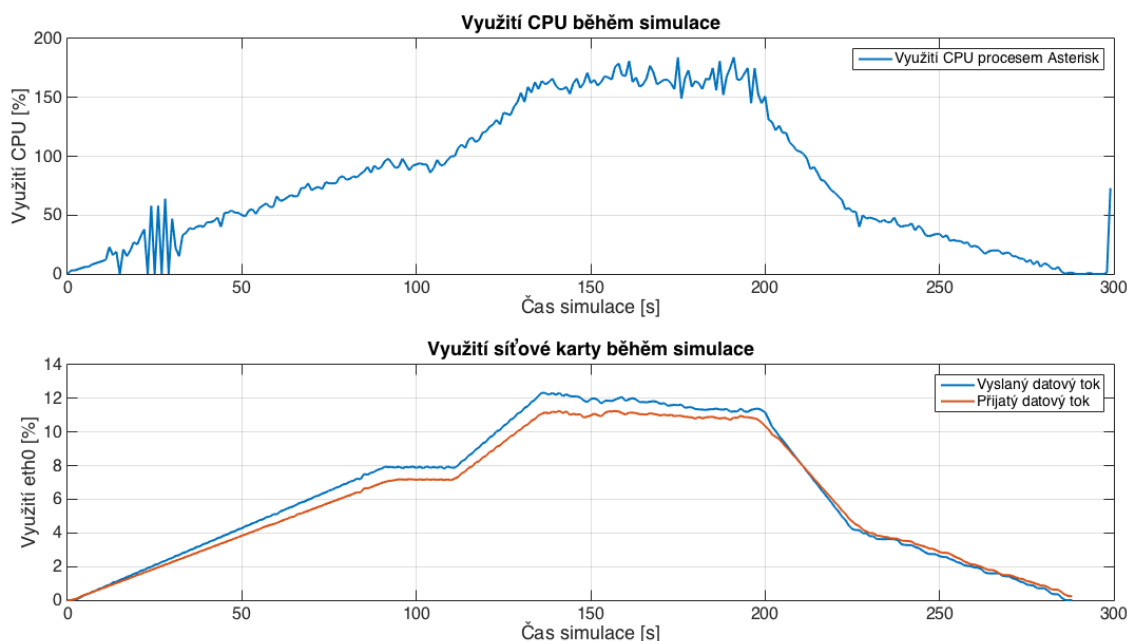
nebylo možné zaručit správnou kvalitu při poslechu v reálném čase. Všechny zpožděné streamy byly ze směru od ústředny ke klientovi. Pro zaručení kvalitnějšího přenosu hlasu by bylo vhodné snížit počet souběžných volání minimálně o 15 hovorů.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	50	93,03	93,19	93,20	93,20	93,20	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	50	36,35	84,20	93,64	92,18	93,11	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64
Caller max RFC3550 jitter (ms)	50	4,93	13,12	14,41	13,97	14,20	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	50	1,87	2,95	3,99	3,26	3,30	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99
Caller SDP-RTP delay (ms)	50	18,00	39,98	100,00	57,00	62,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	50	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	50	45,60	124,03	208,64	194,15	194,29	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64
Called max RFC3550 jitter (ms)	50	8,33	14,21	18,65	18,00	18,43	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65
Called mean RFC3550 jitter (ms)	50	6,14	6,37	6,45	6,43	6,44	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45
Called SDP-RTP delay (ms)	50	-20,00	9,60	30,00	20,00	24,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
100 response delay (ms)	50	0,00	2,32	24,00	8,00	16,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Answer delay (ms)	50	14,00	48,30	342,00	78,00	88,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00
-24dB delay (ms)	50	541,14	569,40	611,65	591,44	597,23	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65
RTCP RTT (ms)	50	0,00	7,14	16,17	10,50	12,59	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17
RTCP caller lost packets (%)	50	0,00	1,65	50,24	0,00	0,04	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24
RTCP caller max jitter (ms)	50	12,24	13,43	14,53	14,08	14,41	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53
RTCP called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	50	0,00	0,31	1,75	1,00	1,50	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Media threads delay (ms)	50	6,63	28,16	77,38	51,24	66,06	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38
Signaling thread delay (ms)	50	0,00	0,01	0,10	0,00	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
GUI thread delay (ms)	50	367,03	906,91	2186,48	1514,12	1898,53	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48

Obrázek 8.8: Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Pomocí programu SIP Tester a SIPp bylo zrealizováno omezené měření z důvodu licenčního omezení. Programem SIPp byly generovány hovory s intenzitou 2 hovorů za vteřinu s maximálním možným počtem 50 souběžných i celkových hovorů, jelikož SIP Tester ve free licenci umožňuje zpracovat pouze 50 souběžných volání. Na příj-

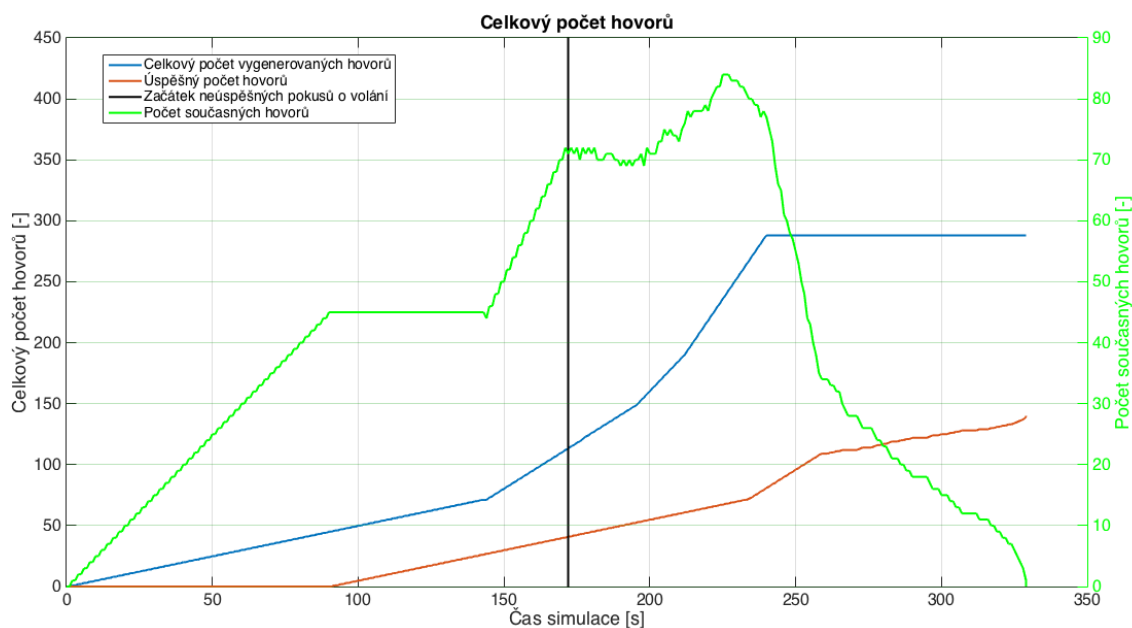
mací straně odpovídal program SIP Tester a vyhodnocoval nejen zprávy SIP, ale také veškeré kvalitativní údaje o RTP streamech. Jednotlivé statistiky jsou vyobrazeny v reportu ze simulačního programu a jsou znázorněny na obrázku 8.8. Výsledky odpovídají předpokladům získaných při simulaci mezi klienty tvořeny programem SIPp. Ústředna zvládá obsluhovat signalizaci a přenáší RTP pakety, ale opět se ukázalo, že v tak velkém zatížení dochází ke zpoždění RTP paketů a v tomto případě dokonce i ke ztrátám a tím ke zhoršení kvality hovoru. Při opakovaných simulacích a snižování počtu současných hovorů bylo zjištěno, že ideální zatížení by mohlo odpovídat maximálnímu počtu 25 současných hovorů. Podrobné výsledky jsou přílohou této práce.



Obrázek 8.9: Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Při simulaci pomocí programu SIPp pro zjištění maximální počtu současných hovorů byla ústředna maximálně vytížena ve chvíli, kdy je dosaženo přibližně 65 současných hovorů. Na obrázku 8.9 je znázorněno využití procesoru procesem ústředny Asterisk. Hodnoty jsou vyobrazeny z výpisu linuxové distribuce pomocí *pidstat*, kde jsou hodnoty vyobrazeny pro jedno jádro procesoru, ale systém využívá všechny jádra, proto je dosaženo více jak 100 procent využití na jednom jádře. Zbytek zpracovávají ostatní jádra. Vytížení síťové karty je okolo 12 Mbit/s při maximálním zatížení.

Při změně operačního systému byla simulace opakována a výsledky jsou takřka totožné. Konkrétně při využití OS Ubuntu dochází k výpadkům hovorů při 70 současných hovorech. Výsledky simulace jsou o přibližně 10 současných hovorů lepší, ale samozřejmě i zde platí, že při takto velkém počtu volání je velké zpoždění přenosu hlasu a tím nelze zaručit kvalitu hovoru. Z grafu na obrázku 8.10 jsou patrné výsledky simulace. Po dosažení 70 souběžných volání dochází k výpadkům a znovu generování žádostí, na které již není odpověď od ústředny. V průběhu simulaci kdy v čase 172 vteřin dochází k znovu odesílání požadavků a vypršení časových limitů.



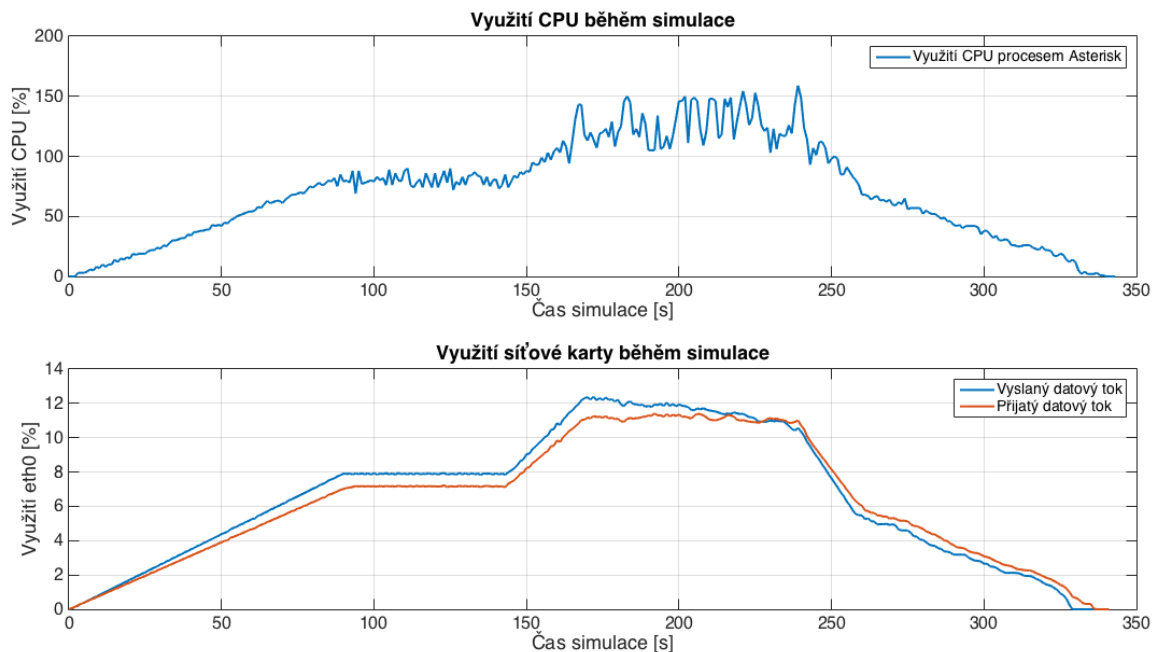
Obrázek 8.10: Simulace souběžných hovorů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Při opakování simulace za pomoci programu SIPp a SIP Tester byla analyzována kvalita RTP streamu, aby bylo možné zjistit skutečně reálnou hodnotu souběžných volání. Testy byli opakovány jako v předchozím případě operačního systému Rasbian pro 50, 30 a 25 souběžných volání. Výsledky opět ukazují, že 50 i 30 souběžných volání je příliš náročných pro včasné zpracování ústřednou a tím dochází ke zhoršení kvality přenášeného hlasu. Statistiky pro 50 volání jsou na obrázku 8.11. Další výsledky jsou přílohou této práce.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	50	0,00	0,01	0,07	0,02	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Caller G.107 MOS	50	4,40	4,41	4,41	4,41	4,41	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
Caller G.107 R-factor	50	92,95	93,17	93,20	93,12	93,03	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95
Caller max delta (ms)	50	43,27	51,63	79,54	61,05	61,89	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54
Caller max RFC3550 jitter (ms)	50	7,60	9,51	11,40	11,05	11,29	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	50	1,44	1,56	1,68	1,63	1,64	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Caller SDP-RTP delay (ms)	50	22,00	43,92	102,00	64,00	72,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00
Called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	50	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	50	47,60	111,64	184,12	148,30	168,29	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12
Called max RFC3550 jitter (ms)	50	9,03	13,62	17,67	16,20	17,16	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67
Called mean RFC3550 jitter (ms)	50	6,33	6,37	6,44	6,41	6,43	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
Called SDP-RTP delay (ms)	50	-20,00	10,68	52,00	22,00	31,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
100 response delay (ms)	50	0,00	1,38	25,00	1,00	9,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Answer delay (ms)	50	20,00	53,94	327,00	81,00	88,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00
-24dB delay (ms)	50	541,08	570,87	624,88	588,05	593,06	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88
RTCP RTT (ms)	50	3,34	6,61	14,08	9,41	10,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08
RTCP caller lost packets (%)	50	0,00	0,78	38,48	0,04	0,04	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48
RTCP caller max jitter (ms)	50	9,46	11,20	13,23	12,77	13,07	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
RTCP called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	50	0,00	0,36	2,13	1,00	1,38	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
Media threads delay (ms)	50	11,56	60,35	127,21	102,08	113,96	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21
Signaling thread delay (ms)	50	0,00	3,30	94,89	0,00	21,93	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89
GUI thread delay (ms)	50	19,93	488,73	1316,73	864,95	1020,04	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73

Obrázek 8.11: Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Využití systémových prostředků je na obrázku 8.12. Opět dochází k maximálnímu využití v době, kdy je v systému nejvíce hovorů, ale oproti operačnímu systému Raspbian je procesor zatěžován méně, a to přibližně o 10 procent. Kapacita síťové karty není využita naplno, pro obsluhu 70 hovorů postačí přibližně 20 procent síťové konektivity.

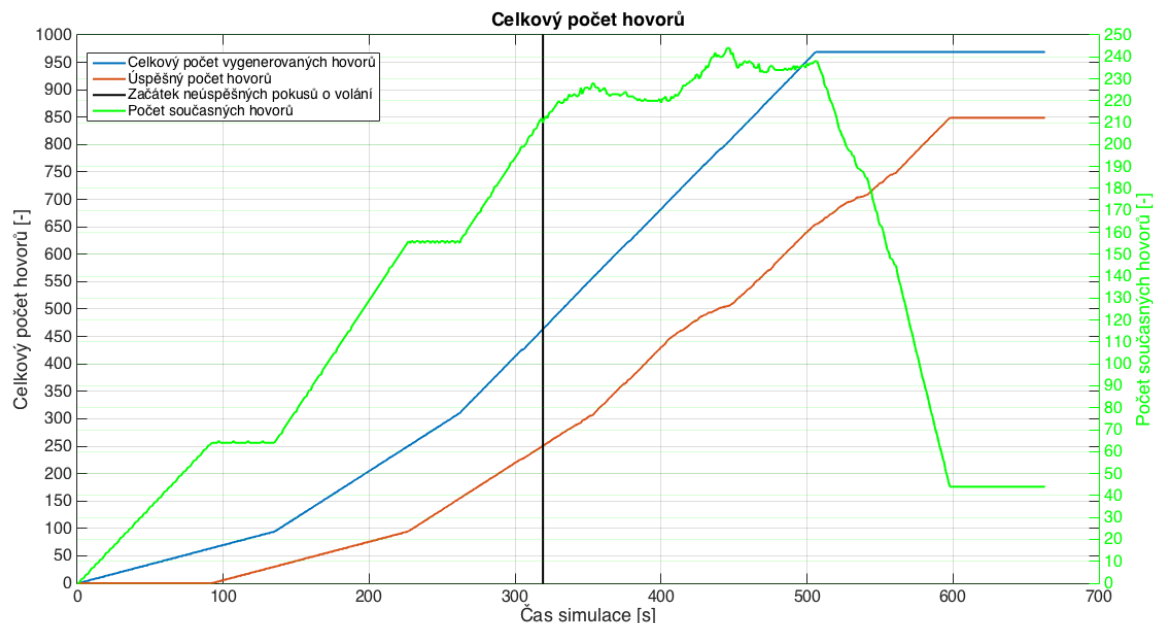


Obrázek 8.12: Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

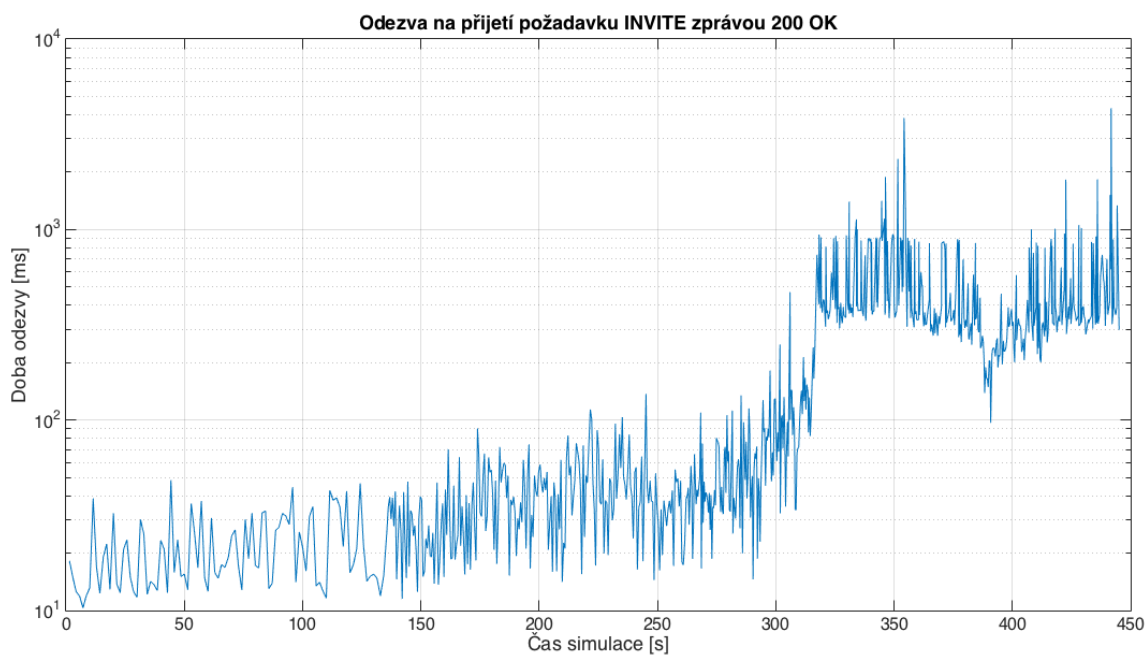
8.1.3 Scénář INVITE s přímým přenosem médií

U testovacího scénáře s přímým přenosem médií mezi koncovými stanicemi je potřeba změnit nastavení přenosu médií na ústředně, aby přenos mohl být přepnut do režimu, kdy ústředna nebude médií zatěžována. Scénář byl spuštěn s počátečním generováním jednoho hovoru za vteřinu a po 60 vteřinách se vždy zvýšil o jeden hovor za vteřinu. Na konci simulace byly generovány hovory s intenzitou čtyř volání za vteřinu. Délka simulace je závislá na vytíženosti ústředny.

Simulace ukázali, že pokud ústředna bude realizovat pouze signalizační část hovoru a přenášené audio se bude přenášet odděleně dokáže ústředna odbavit přibližně 210 současných hovorů. Této hodnoty bylo dosaženo za předpokladu, že ústředna byla vytěžována dvěma novými hovory za vteřinu a délka hovoru byla devadesát vteřin. Po dosažení této hodnoty již ústředna nezvládá reagovat a nelze tedy navázat další spojení. Graf výsledné simulace je vyobrazen na obrázku 8.13.



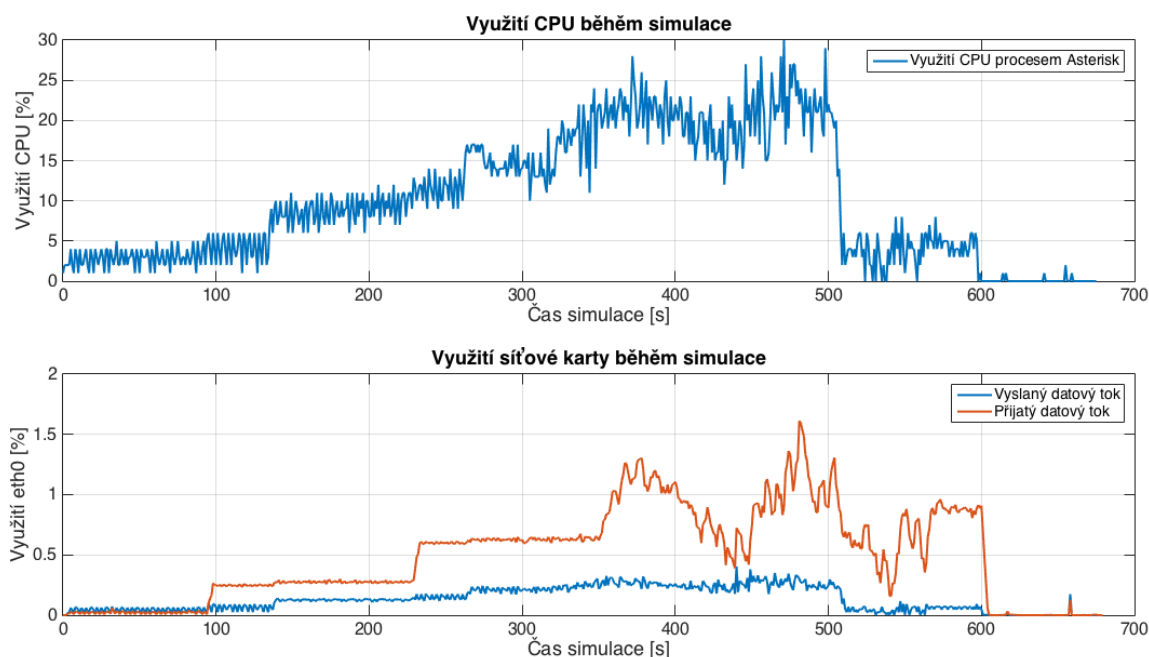
Obrázek 8.13: Simulace hovorů s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian



Obrázek 8.14: Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

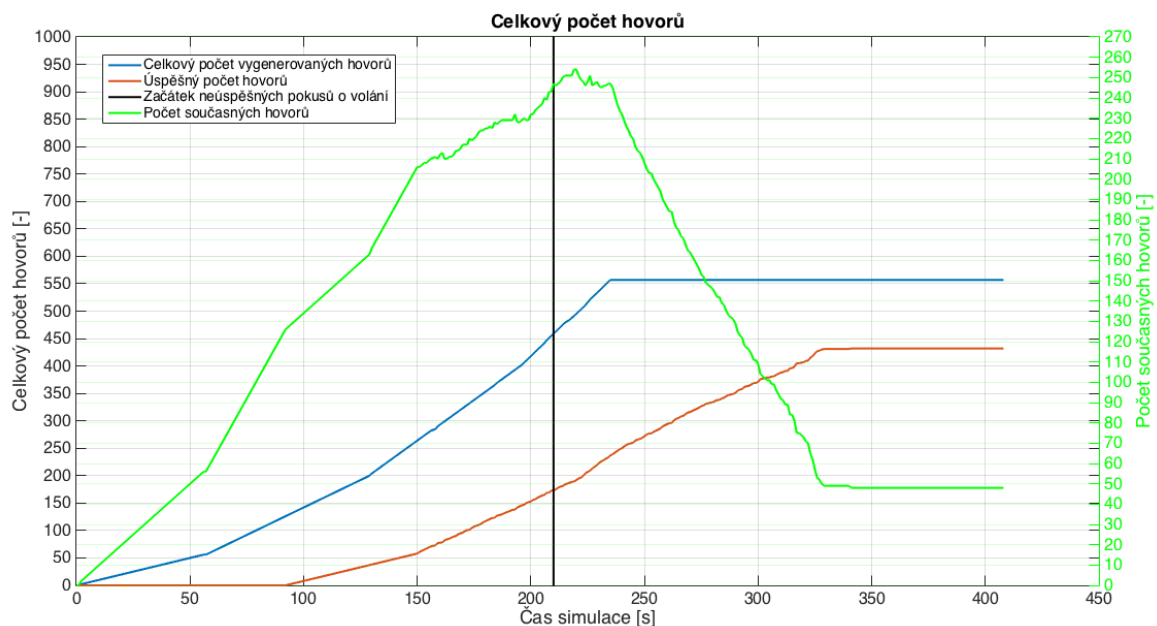
Při přenosu médií prostřednictvím ústředny byla sledována kvalita přenášeného streamu, jelikož v tomto případě jsou média přenášena přímo nemá tedy ústředna vliv na kvalitu přenášeného streamu. V tomto případě je zaznamenávána odezva ústředny na zprávy INVITE, která je vyobrazena na obrázku 8.14. V okamžiku plného vytížení ústředny se reakční doba pohybuje v jednotkách vteřin a již není možné zaručit kvalitní přenos signalizace.

Využití procesoru nedosahuje plného zatížení v průběhu simulace, ale v případě přenosu pouze signalizace dojde k limitní hodnotě dříve, jelikož ústředna není zatěžována trvale. Využití systémových prostředků je na obrázku 8.15.



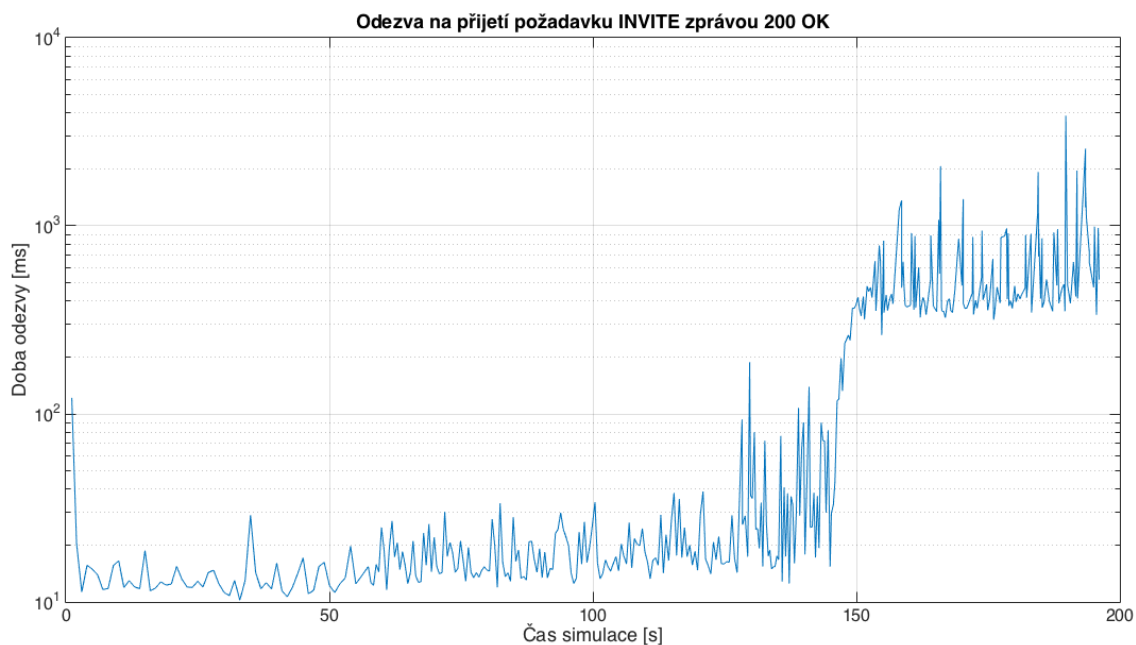
Obrázek 8.15: Využití systémových prostředků při přímém přenosu médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Tento testovací scénář byl také realizován v operačním systému Ubuntu. Výsledky jsou podobné, ale lze dosáhnout většího počtu souběžných volání. Test proběhl za stejných podmínek. Nejdříve bylo generováno jedno volání za vteřinu a následně byla hodnota zvyšována. Při simulaci byl zvolen kratší časový úsek mezi navyšováním nových volání a tím bylo možné dosáhnout maxima dříve než v předchozí simulaci s operačním systémem Raspbian. V realizované simulaci bylo dosaženo maximálně 240 současných volání. Jak se již projevilo v minulých testech operační systém Ubuntu lépe pracuje se systémovými zdroji a umožňuje získat ze zařízení větší výkon. Na obrázku 8.16 je vyobrazen průběh celé simulace. Ústředna se celkově při využití OS Ubuntu projevuje stabilněji a nedochází k neočekávaným výpadkům.



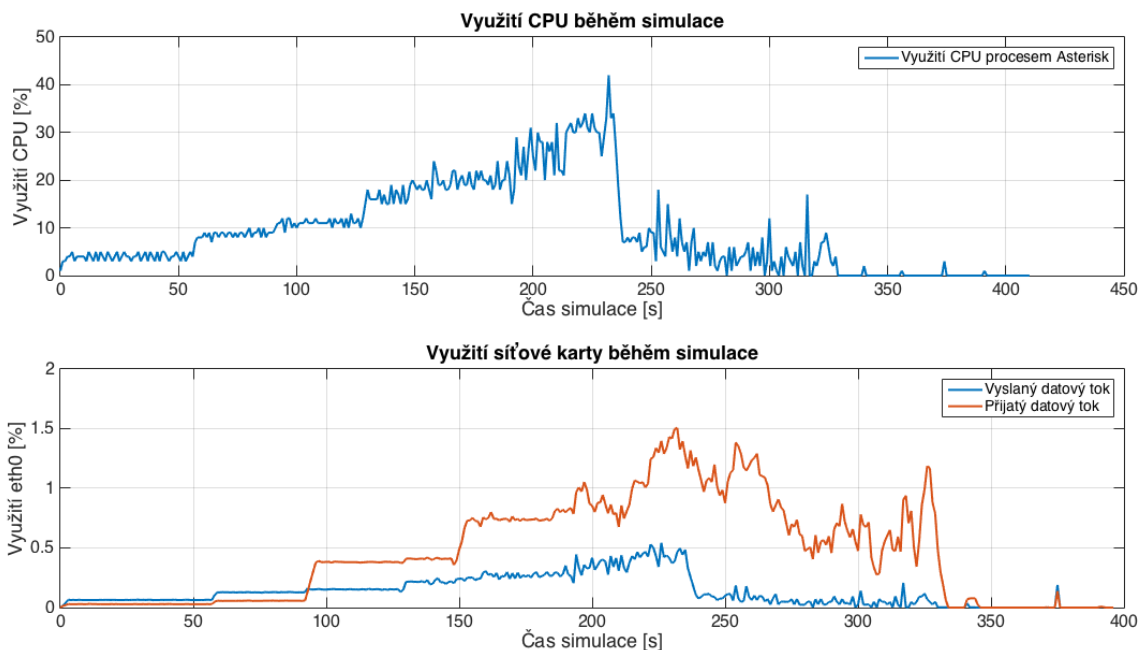
Obrázek 8.16: Simulace hovorů s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Odezva ústředny na žádosti INVITE dosahuje přibližně stejných hodnot. Odezva je měřena od poslání první žádosti INVITE až do okamžiku než dojde k navázání spojení, tedy přijetí zprávy 200 OK. Odezva pro tuto konfiguraci ústředny je na obrázku 8.17.



Obrázek 8.17: Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Při zatížení systému je procesor vytěžován více než v případě OS Ubuntu. Tato skutečnost je jednak způsobena možností realizovat více souběžných hovorů a také chováním operačního systému. Vytíženost systémových prostředků je na obrázku 8.18.



Obrázek 8.18: Vyžití systémových prostředků při přímém přenosu médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

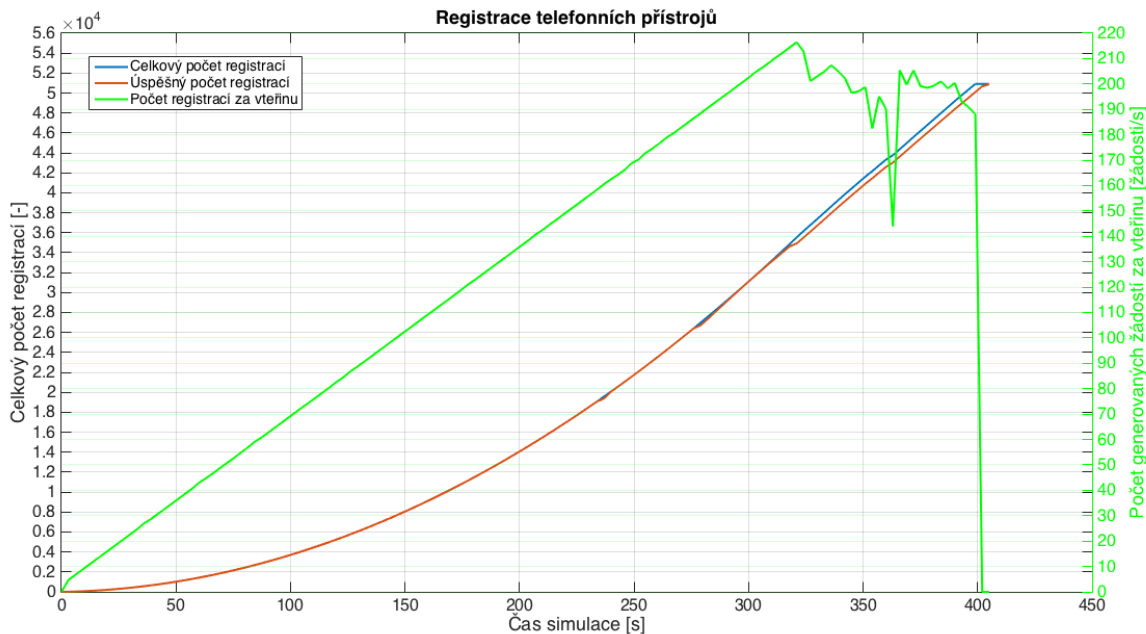
V případě, kdy při běhu simulace je zároveň ústředna vytěžována generovaným TCP tokem z programu iPerf dochází k nepatrnému snížení maximální hodnoty souběžných volání a k zvýšení reakční odezvy v řádech stovek milisekund. Jelikož celkový vliv na přenos není příliš velký dále nebyla tato možnost při simulacích využívána.

8.2 Orange Pi PC

Zařízení Orange Pi bylo testováno na operačním systému Ubuntu a Debian. Testy byly realizovány se stejným nastavením a parametry, aby bylo možné získané výsledky porovnat. Vliv programu iPerf nebyl zaznamenáván, jelikož v předchozích simulacích byl jeho vliv zanedbatelný.

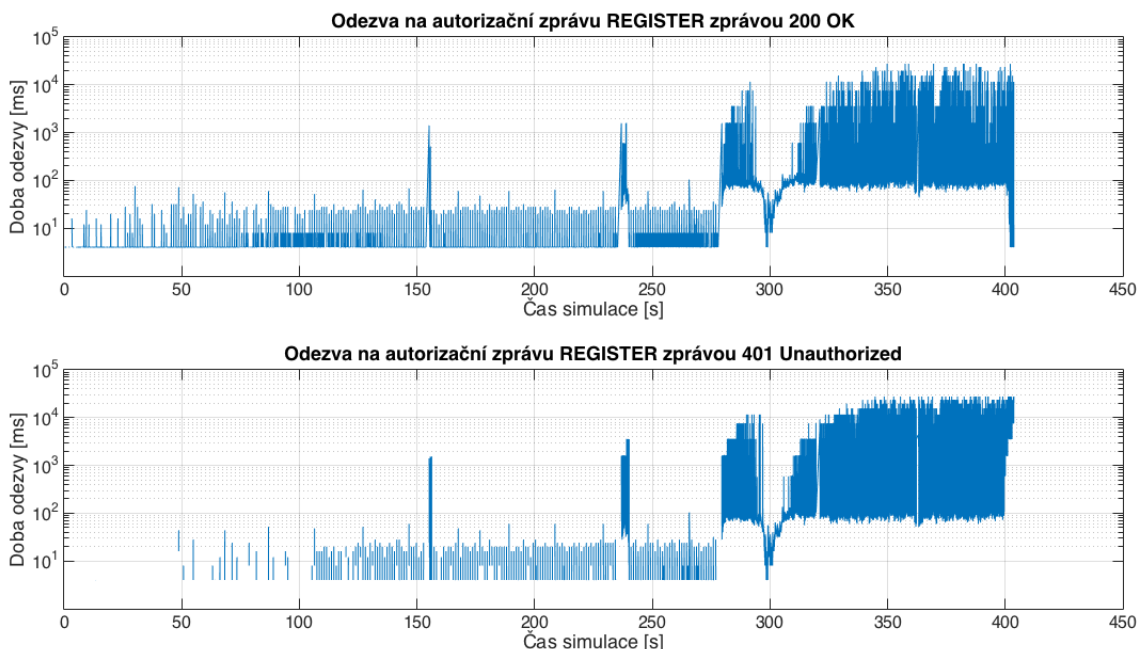
8.2.1 Scénář REGISTER

Simulace probíhala s počátečním nastavením pěti žádostí za vteřinu a každé tři vteřiny se hodnota navyšovala o 2 žádosti za vteřinu. K prvním opakovaným žádostem došlo při generování 160 žádostí za vteřinu a následně při 180. V těchto momentech se jednalo pouze o jednotlivé žádosti a k trvalému přetížení a zahlcení ústředny došlo, až v okamžiku 210 žádostí, jak vyplývá z grafu na obrázku 8.19.



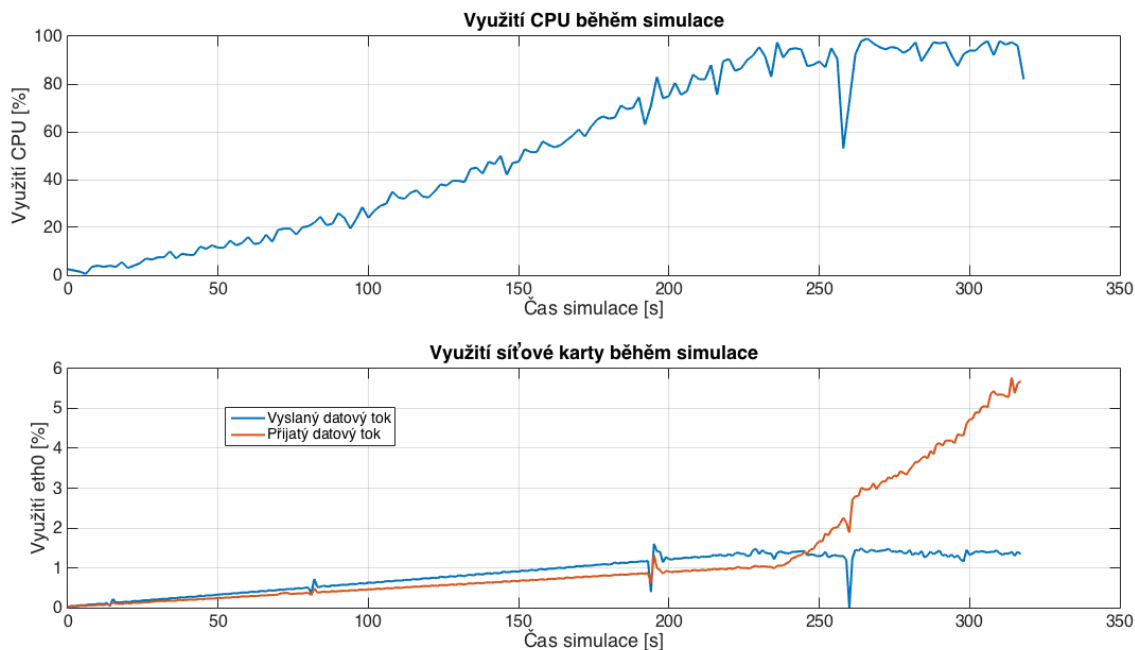
Obrázek 8.19: Registrace klientů k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Ubuntu

Odezva na registrační žádosti se se zvyšujícími požadavky zvětšuje a při dosažení krajních hodnot generovaných žádostí za vteřinu dochází k zvýšení reakční doby. Reakční doba se pohybuje v rozmezí jednotek milisekund až desítky vteřin. Výsledný průběh odezvy je znázorněn na obrázku 8.20.



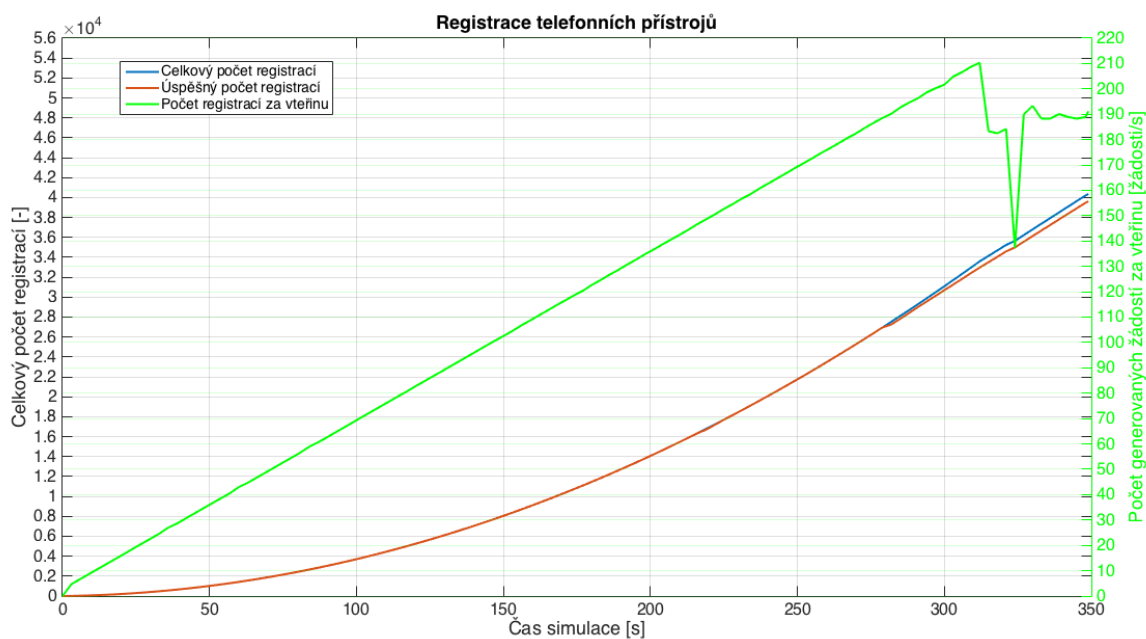
Obrázek 8.20: Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Ubuntu

Využití systémových prostředků je znázorněno na obrázku 8.21. Systémové zdroje jsou využity na maximum v době dosažení 210 žádostí za vteřinu.



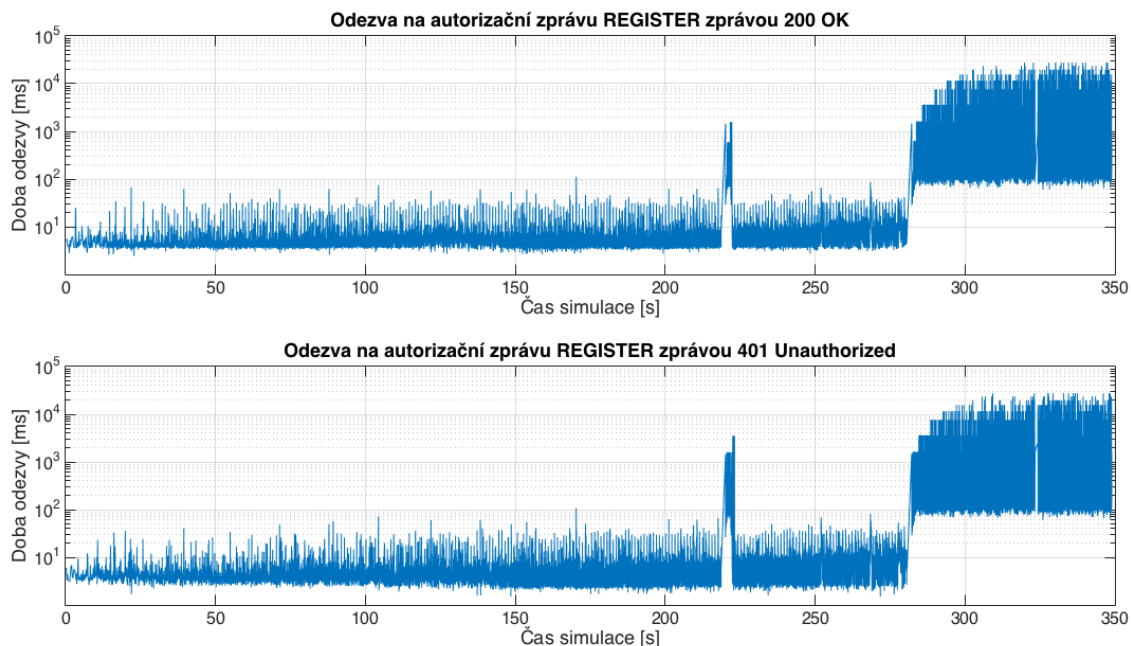
Obrázek 8.21: Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Orange Pi Pc - OS Ubuntu

Po změně operačního systému došlo k nepatrnému snížení dostupnosti ústředny. Test byl spuštěn ve stejné konfiguraci jako s předchozím operačním systémem. Pro OS Debian lze dosáhnout maximálně 195 žádostí za vteřinu, aby ústředna byla schopna na žádosti reagovat. K prvním zpožděným odpovědím dochází při 153 žádostí za vteřinu. Graf průběhu simulace je na obrázku 8.22.

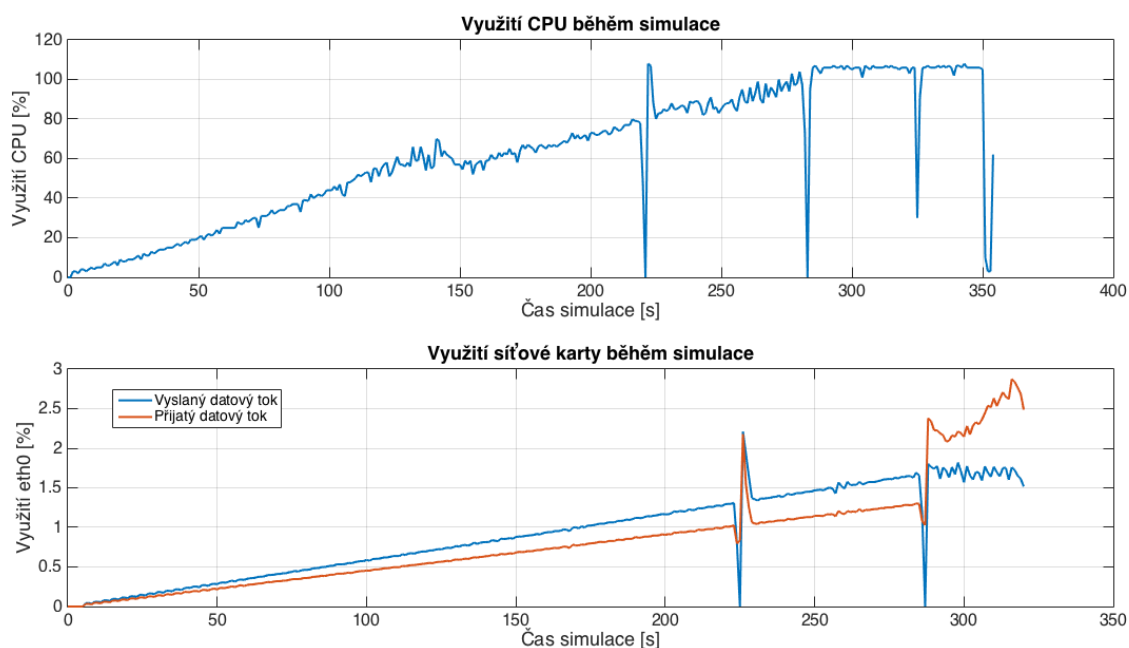


Obrázek 8.22: Registrace klientů k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Debian

V čase simulace 270 vteřin dochází k přetížení ústředny a na grafu odezvy odpovědí od ústředny je vidět velké zvýšení odezvy až o tři řády. Graf je pro lepší vyobrazení zobrazován v logaritmickém měřítku a je na obrázku 8.23. Z výsledku je patrné, že při dalším zvýšení by již ústředna nedokázala dále zpracovávat žádosti a odpovídat na registrační zprávy. Při simulaci v čase 220 vteřin došlo ke krátkodobému navýšení odezvy. V této hodnotě je pravděpodobně maximální počet registrací, kterým lze ústřednu zatížit.



Obrázek 8.23: Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Debian

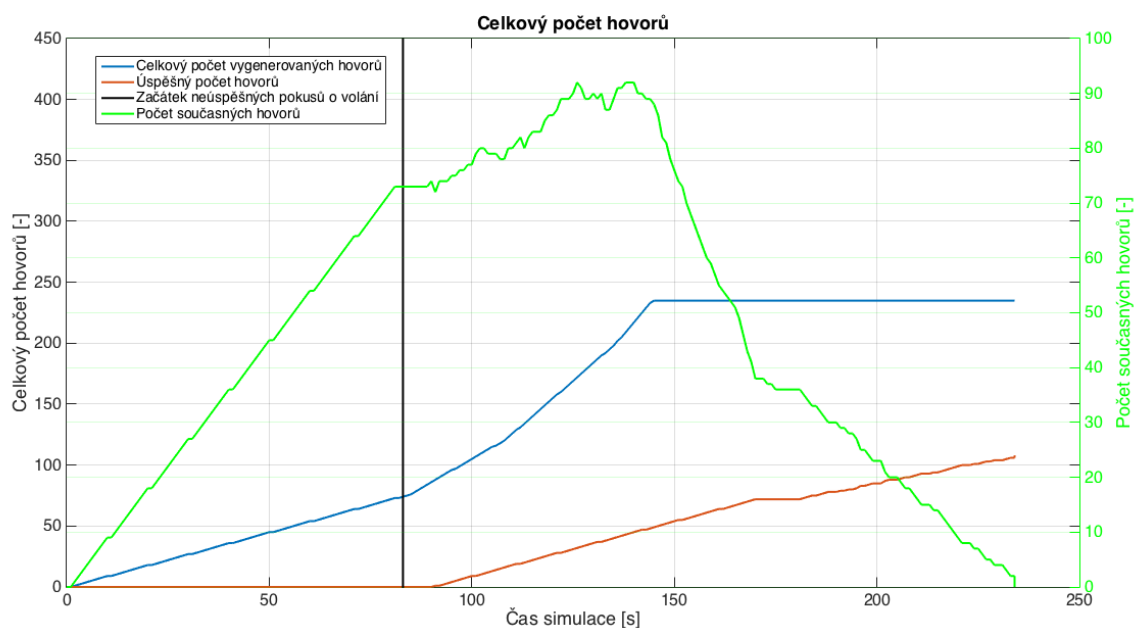


Obrázek 8.24: Vyžití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Orange Pi Pc - OS Debian

K maximálnímu využití procesoru dochází v čase 270 vteřin, kdy je generováno 195 žádostí za vteřinu. Využití síťové karty dosahuje přibližně dvou procent z celkové kapacity. Výsledné grafy využití systémových prostředků jsou na obrázku 8.24.

8.2.2 Scénář INVITE s RTP

Generování hovorů probíhá podle předem stanoveného scénáře a je tedy generován 1 hovor za 2 vteřiny a po dosažení 45 současných hovorů je generování navýšeno na 1,5 hovorů za vteřinu. Maximální počet souběžných volání je omezen na 100. Při spuštění simulace jsou zachytávány pakety na straně UAS pro pozdější analýzu přenosu RTP paketů.



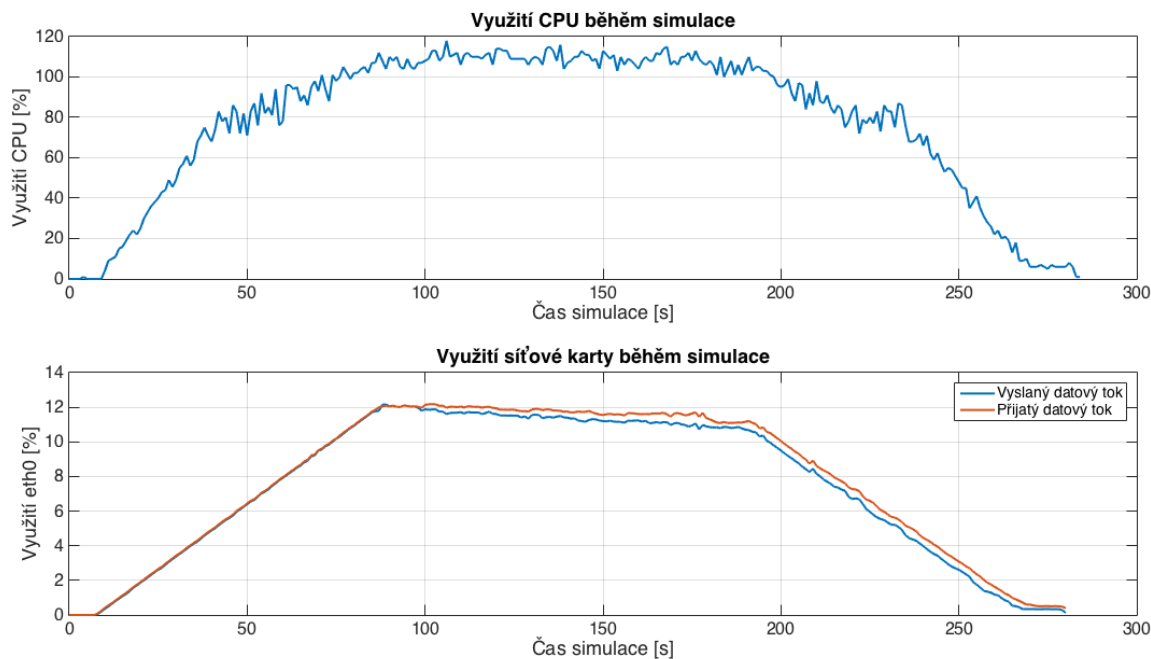
Obrázek 8.25: Simulace souběžných hovorů k ústředně Orange Pi - OS Ubuntu

Simulací bylo zjištěno, že výsledky maximálního počtu souběžných hovorů při přenosu médií prostřednictvím ústředny jsou velmi podobné jako u Raspberry Pi. Bohužel tyto výsledky nevypovídají o kvalitě RTP, a tak jako v předchozím případě bylo nutné analyzovat zároveň i kvalitu přenášeného hlasu. Z naměřených výsledků na obrázku 8.25 je patrný vliv současných hovorů a maximálního možného počtu současných volání, při kterém je ústředna ještě schopna reagovat a odpovídat na další žádosti. Tato hodnota 73 současných hovorů je limitní a může se při opakovaných simulacích mírně lišit. Na základě těchto výsledků byla realizována analýza kvality přenášeného hlasu.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,01	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,03	93,18	93,20	93,12	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	30	70,33	86,22	100,73	92,34	96,25	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	7,90	8,82	10,78	9,40	9,75	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	1,89	2,01	2,14	2,09	2,10	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	23,00	45,80	119,00	60,00	82,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	30	34,73	44,53	62,35	52,06	52,20	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	7,45	8,39	9,60	8,77	9,04	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	6,26	6,29	6,33	6,31	6,32	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33
Called SDP-RTP delay (ms)	30	-19,00	6,63	19,00	16,00	16,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
100 response delay (ms)	30	0,00	0,90	7,00	1,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Answer delay (ms)	30	25,00	64,53	332,00	83,00	112,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00
-24dB delay (ms)	30	548,30	564,49	583,91	578,71	583,68	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91
RTCP RTT (ms)	30	1,83	3,26	5,32	4,46	4,84	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	0,01	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
RTCP caller max jitter (ms)	30	7,94	8,87	10,77	9,45	9,74	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	30	0,00	0,37	2,00	0,75	0,88	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Media threads delay (ms)	30	7,10	16,39	29,26	26,18	28,90	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	1,64	49,14	0,00	0,08	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14
GUI thread delay (ms)	30	0,79	131,12	630,45	565,89	619,39	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45

Obrázek 8.26: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi 2 - OS Ubuntu

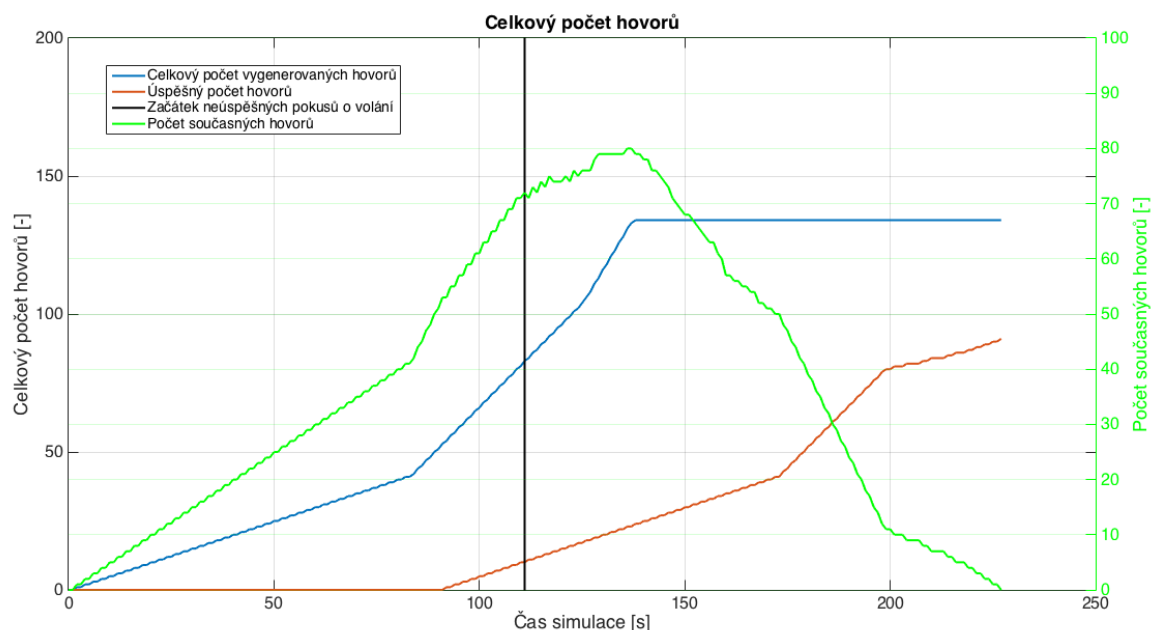
Z naměřených výsledků z programu SIP Tester vyplývá, že maximální počet souběžných volání, které je ústředna schopná obsloužit při využití systému Orange Pi Pc, je okolo 30 hovorů. Naměřené výsledky jsou dané aktuálním vytížením sítě a samozřejmě i vzdáleností mezi zařízeními. Důležitými parametry kvality hlasu jsou zpoždění a ztrátovost paketů. Při zvýšení počtu souběžných volání dochází k prodloužení intervalů mezi příchozími pakety a dochází i ke ztrátám paketů. Výsledky pro 30 souběžných volání jsou zobrazeny na obrázku 8.26, další výsledky pro zvyšující se počet volání jsou přílohou této práce.



Obrázek 8.27: Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Orange Pi - OS Ubuntu

Využití systémových prostředků je podobné, jako v případě Raspberry Pi, v průběhu simulace dochází k maximálnímu využití procesoru. Síťová karta není plně využita, jelikož není generován tak velký datový tok, který by plně využil síťovou kartu. Využití je vyobrazeno na obrázku 8.27.

Při použití operačního systému Debian je dosaženo při stejné simulaci k maximálnímu počtu 72 současných volání. Výsledky simulace pro OS Debian jsou na obrázku 8.28. Výsledky jsou opět zkreslující a nezahrnují hodnocení kvality přenášeného RTP streamu. Výsledné zhodnocení kvality přenosu je analyzováno programem SIP Tester, který je popsán v kapitole 5.3.

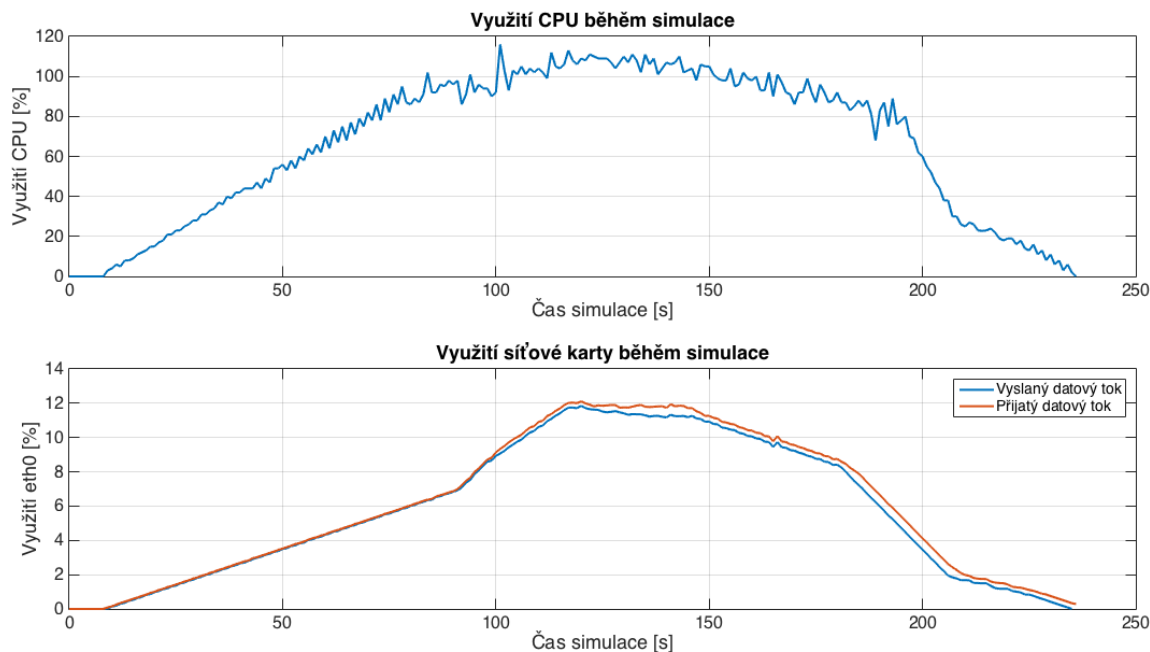

Obrázek 8.28: Simulace souběžných hovorů k ústředně Orange Pi - OS Debian

Při analýze kvality přenášeného audio signálu bylo dosaženo přibližného maximálního počtu volání na hranici 30 současných volání. Při snížení počtu souběžných volání na 25 dochází ke zlepšení parametrů přenosu. Podrobné výsledky jsou přílohou této práce. Při zvýšení počtu souběžných volání na hodnotu 40 již dochází k výraznému zpoždění a ke ztrátám vybraných paketů.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	30	56,43	65,76	71,05	70,83	70,99	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	4,21	5,11	5,75	5,68	5,69	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	0,17	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	11,00	17,57	27,00	22,00	23,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,03	93,19	93,20	93,20	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Called max delta (ms)	30	92,59	114,76	127,02	126,30	126,53	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	15,25	16,72	18,82	17,92	18,06	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	8,40	8,57	8,76	8,72	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76
Called SDP-RTP delay (ms)	30	84,00	127,03	372,00	148,00	180,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00
100 response delay (ms)	30	11,00	42,33	91,00	64,00	77,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00
Answer delay (ms)	30	14,00	44,30	91,00	66,00	77,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00
-24dB delay (ms)	30	283,01	381,82	898,94	454,10	520,88	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94
RTCP RTT (ms)	30	25,89	46,32	74,19	72,00	74,00	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP caller max jitter (ms)	30	0,00	1,42	4,25	2,63	4,13	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
RTCP called max jitter (ms)	30	15,26	16,74	18,92	17,92	18,07	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92
Media threads delay (ms)	30	2,95	13,62	37,08	28,67	34,05	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
GUI thread delay (ms)	30	0,43	120,28	536,87	453,73	536,56	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87

Obrázek 8.29: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi 2 - OS Debian

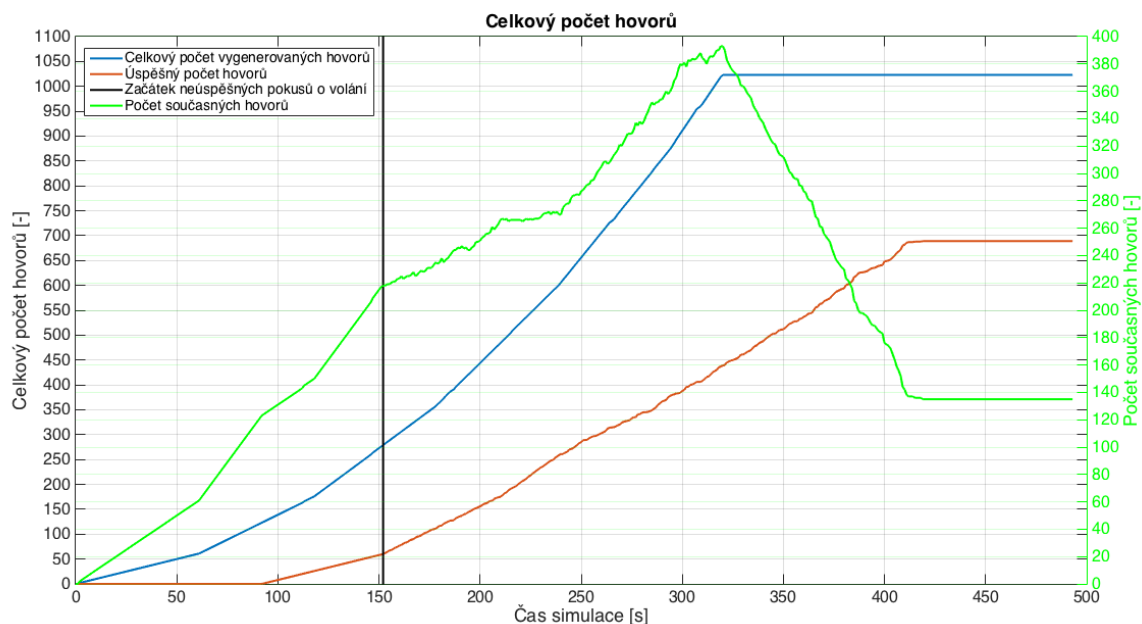
Využití systémových prostředků se projevilo stejně jako v případě předchozích měření. K maximálnímu zatížení dochází v okamžiku plného zatížení ústředny. Graf průběhu využití systémových prostředků je na obrázku 8.30.



Obrázek 8.30: Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Orange Pi - OS Debian

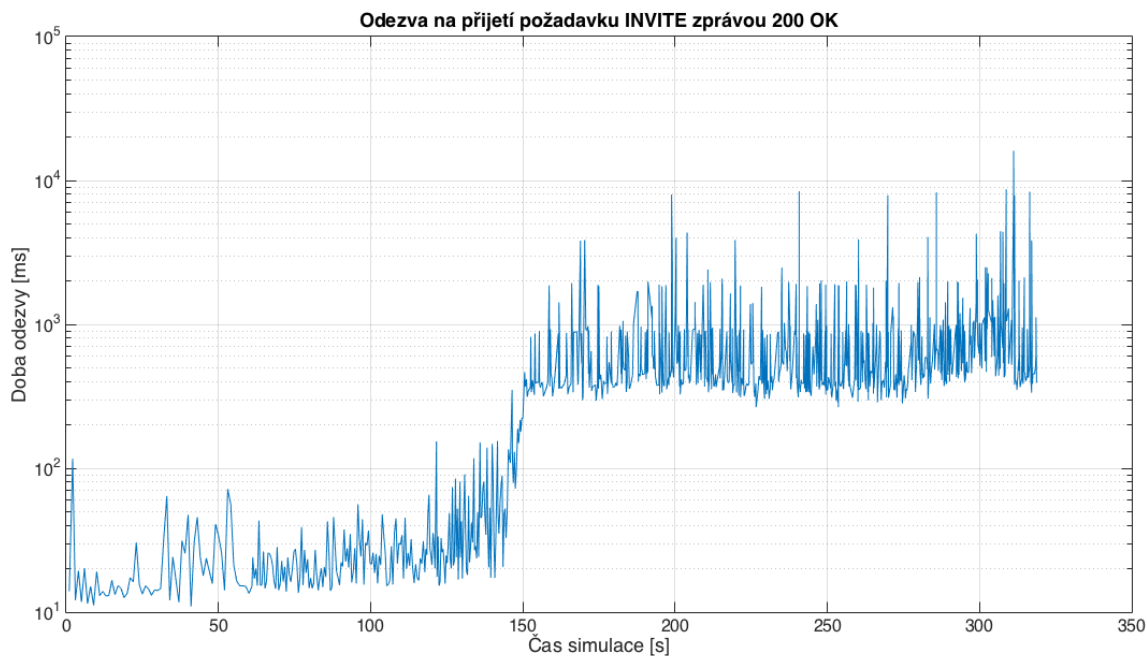
8.2.3 Scénář INVITE s přímým přenosem médií

Scénář byl spuštěn s počátečním generováním jednoho hovoru za vteřinu a po 60 vteřinách se vždy zvýšil o jeden hovor za vteřinu. Na konci simulace byly generovány hovory s intenzitou šesti volání za vteřinu. Délka simulace je závislá na vytíženosti ústředny. V této konfiguraci simulace trvala přibližně 500 vteřin. Na konci simulace již ústředna nevládala reagovat na nové žádosti a dokonce nebylo možné ukončit probíhající spojení.



Obrázek 8.31: Simulace hovorů s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Ubuntu

V průběhu simulace po dosažení maximálního počtu 220 souběžných volání dochází k nedostupnosti ústředny a nelze dále vytvářet další volání. Na obrázku 8.31 je znázorněn celý průběh simulace. Po dosažení 220 volání je dále navyšována hodnota souběžných volání, ale bohužel již se pouze volání vytváří a ústředna neodpovídá a nelze tedy navázat spojení.

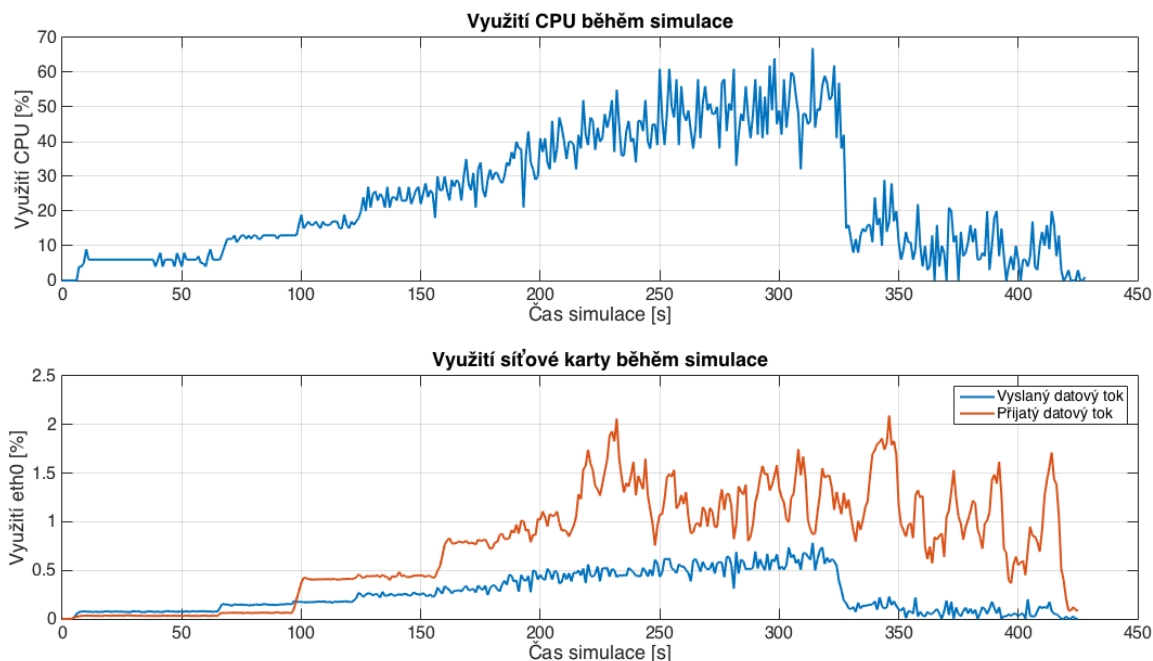


Obrázek 8.32: Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Ubuntu

Odezva ústředny na zprávu INVITE a získání odpovědi 200 OK je měřena jako doba odezvy, než je přijata žádost INVITE ústřednou včetně autorizace. V počátku simulace

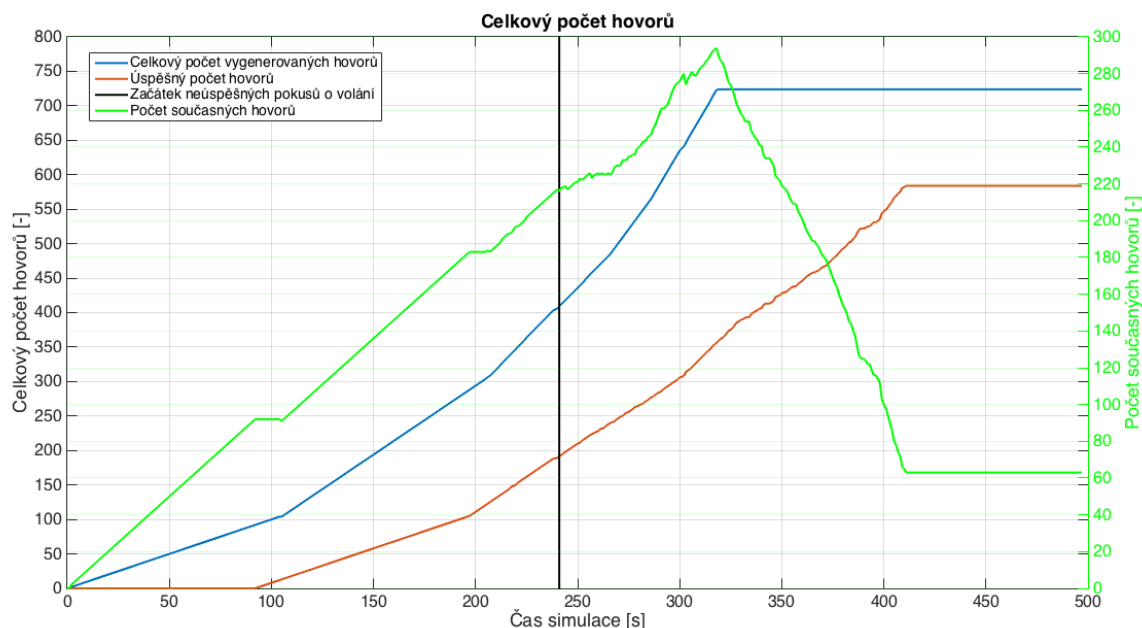
je odezva v řádech jednotek milisekund a na závěr simulace při dosažení maximálního možného počtu je odezva ústředny o tři řády vyšší. Graf průběhu odezvy je na obrázku 8.32.

Při simulaci využití procesoru nedosahuje maximálního zatížení, jelikož není při přenosu signalizace zapotřebí takový výkon jako když jsou přenášeny i média. Graf vytížení je na obrázku 8.33.



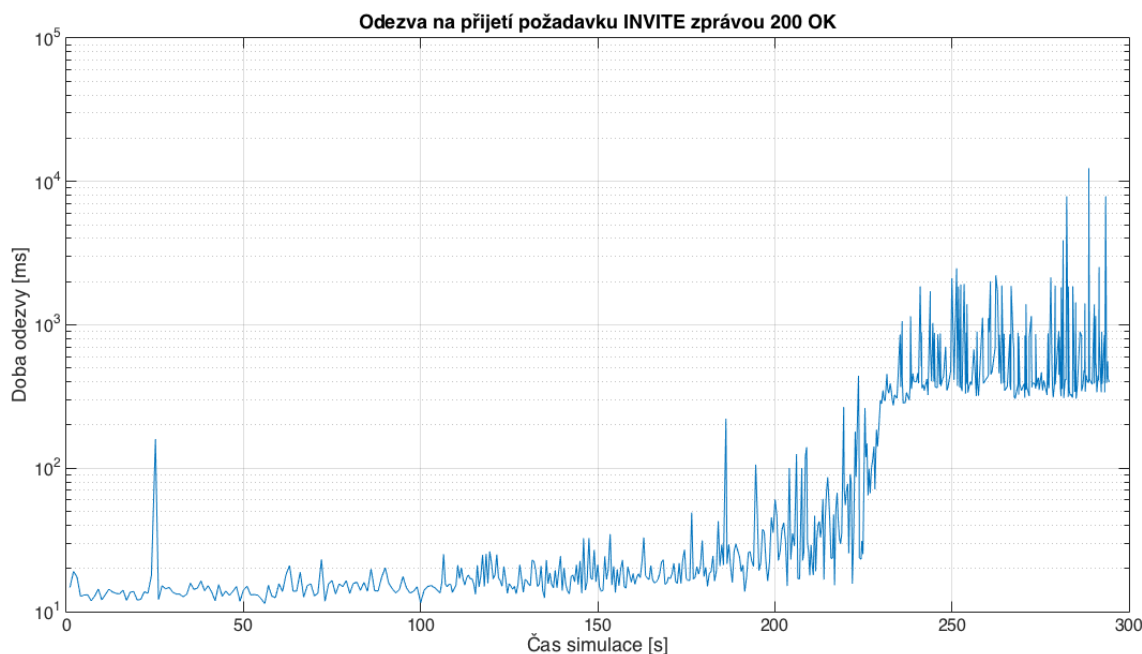
Obrázek 8.33: Využití systémových prostředků při přímém přenosu médií Orange Pi Pc - OS Ubuntu

Simulace hovorů s přímým přenosem médií probíhala také na operačním systému Debian. Výsledky, kterých bylo dosaženo jsou velmi podobné a rozdílný operační systém nemá nijak velký vliv na získané výsledky. Ústředna přestala reagovat na žádostí v okamžiku kdy obsluhovala 216 současných hovorů. Celý průběh simulace je znázorněn na obrázku 8.34.



Obrázek 8.34: Simulace hovorů s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Debian

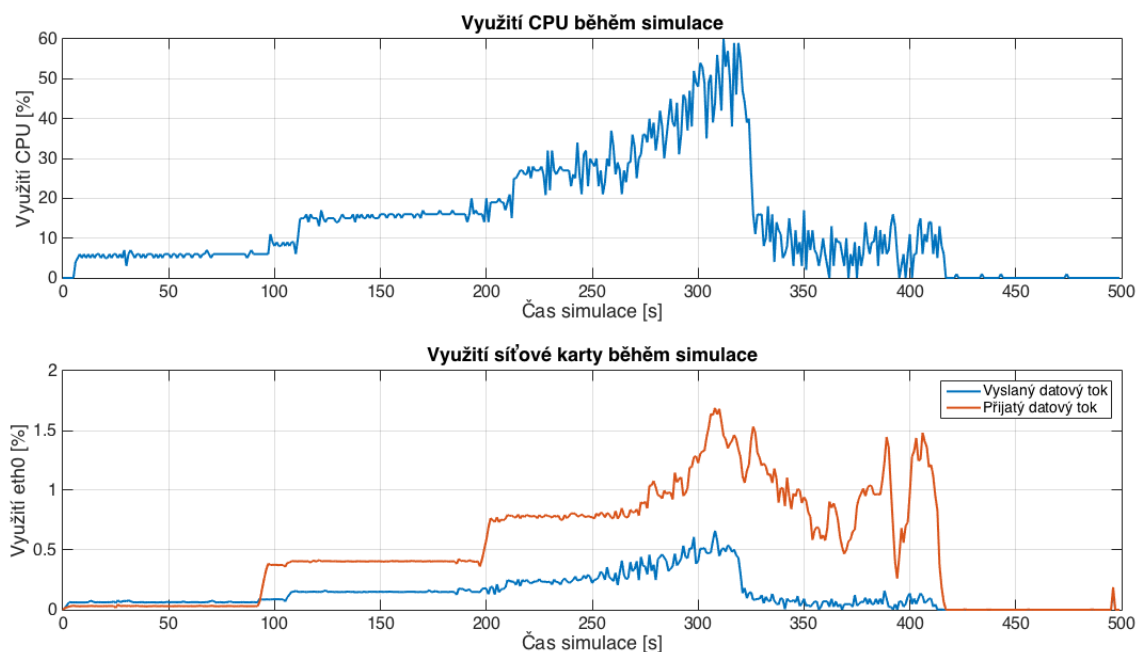
V průběhu simulace byla měřena odezva na zprávu INVITE odpovědi 200 OK. Doba odezvy je závislá na aktuální vytíženosti ústředny. V době kdy je ústředna maximálně vytížena dochází k velkému nárůstu, až do jednotek vteřin. Průběh doby odezvy během simulace je na obrázku 8.35.



Obrázek 8.35: Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Debian

V průběhu simulace není procesor využit na maximální možný výkon, jelikož se přenáší pouze signalizace. Během simulace je dosaženo využití okolo 60-ti procent, což

je pravděpodobně způsobeno maximálním možným počtem vytvořených SIP instancí v ústředně Asterisk.



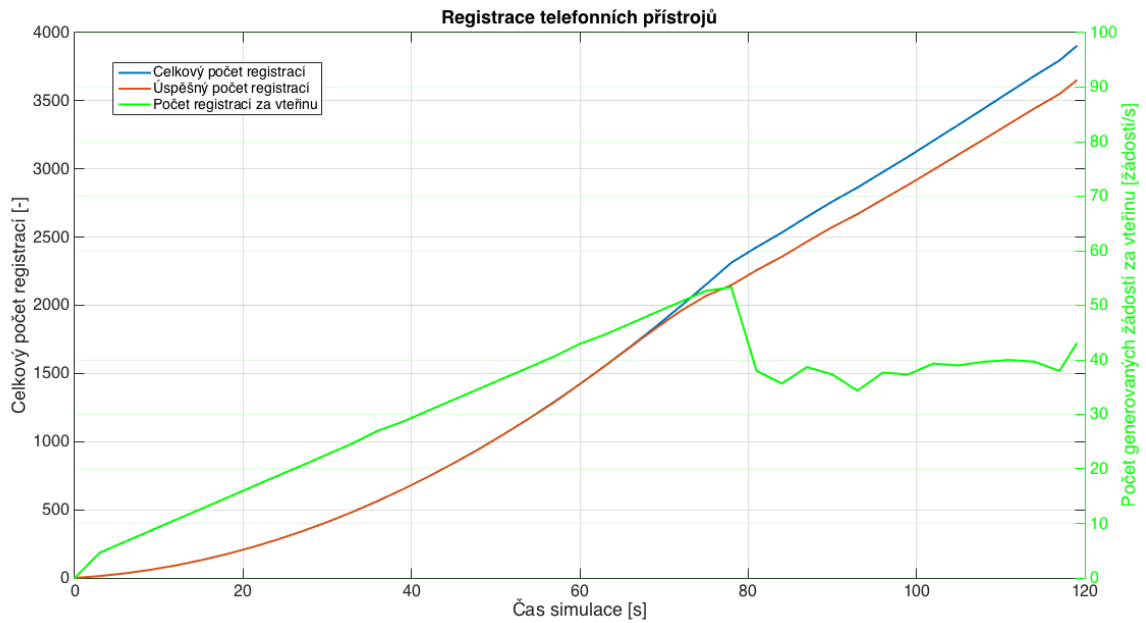
Obrázek 8.36: Vyžití systémových prostředků při přímém přenosu médií Orange Pi Pc - OS Debian

8.3 Grandstream UCM 6102

Zařízení Grandstream UCM 6102 nabízí možnost spravovat ústřednu prostřednictvím webového rozhraní. Bohužel nelze zaznamenávat vytížení procesoru a lze pouze nahlížet na aktuální hodnotu. Zařízení pravděpodobně využívá ústřednu Asterisk, která je upravená výrobcem pro tuto modifikaci.

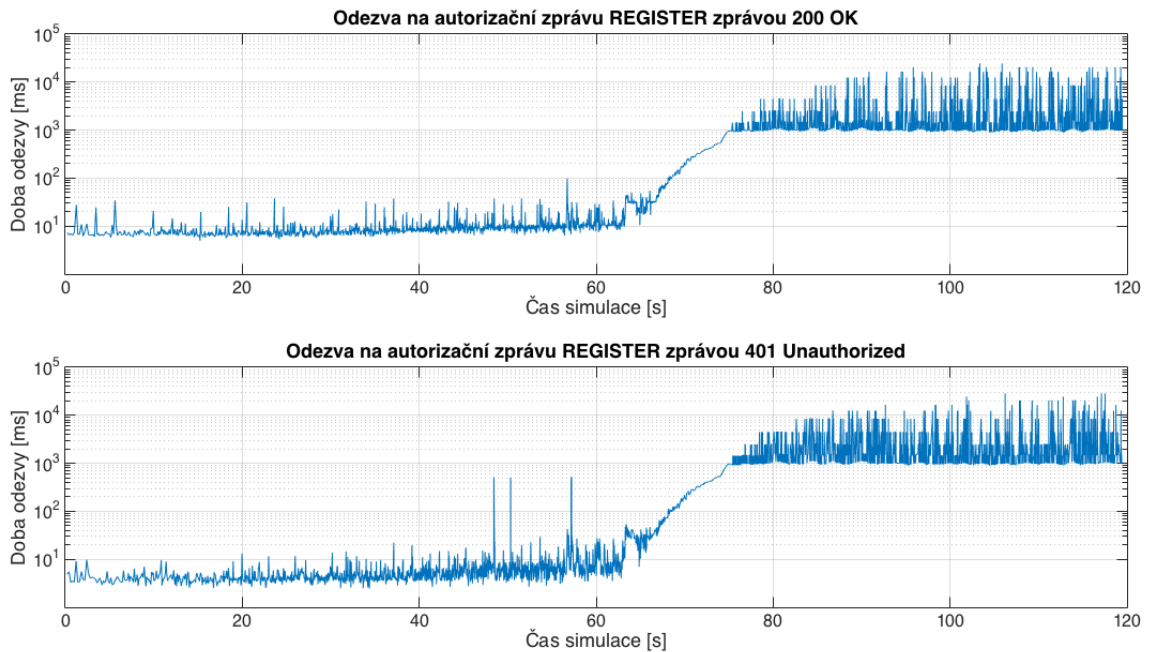
8.3.1 Scénář REGISTER

Testovací scénář REGISTER byl spuštěn ve stejné konfiguraci jako v případě vestavěných systémů, tedy s počátečním generováním pěti žádostí za vteřinu a každé tři vteřiny je počet navýšen o další dvě žádosti za vteřinu. Při simulaci bylo zjištěno, že ústředna zvládne reagovat maximálně na žádosti s intenzitou 45 žádostí za vteřinu. V tomto okamžiku dochází k výpadkům a k znovu odesílání registračních žádostí. Graf simulace je na obrázku 8.37.



Obrázek 8.37: Registrace klientů k ústředně Grandstream UCM 6102

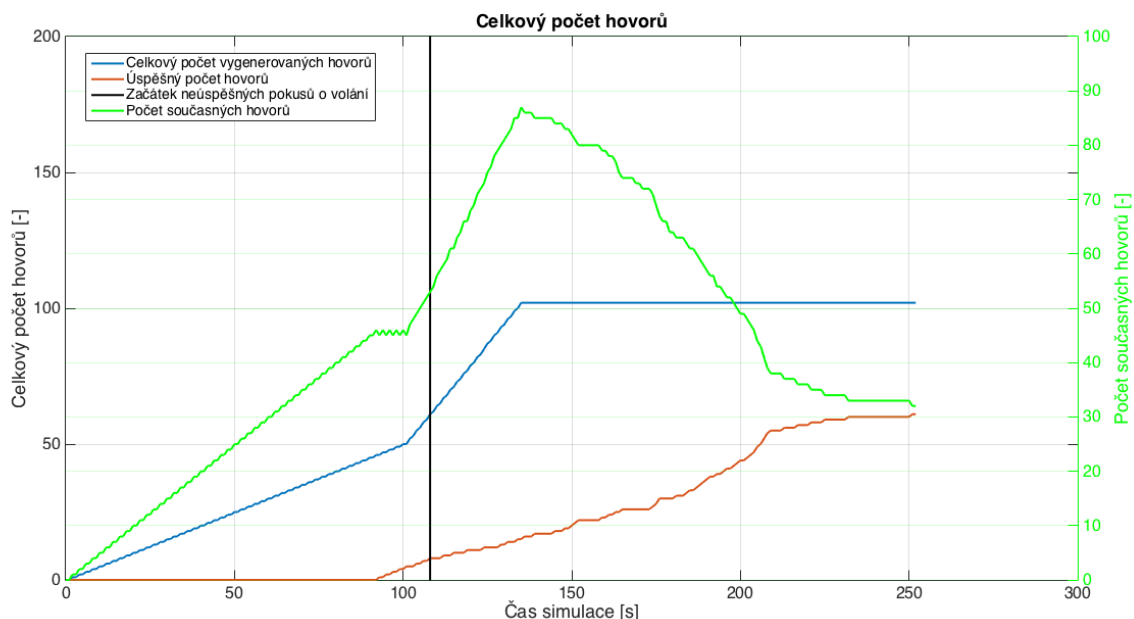
V okamžiku přetížení ústředny dojde k navýšení odezvy na registrační zprávy, a tím dochází k nutnému znovu odesílání žádostí. Hodnoty odezvy se pohybují od jednotek až po tisíce milisekund, jak je znázorněno na grafu 8.38.



Obrázek 8.38: Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Grandstream UCM 6102

8.3.2 Scénář INVITE s RTP

Testovací scénář pro realizaci hovoru včetně přenosu hlasu byl spuštěn s počátečním generováním jednoho hovoru za dvě vteřiny. Po dosažení 45 souběžných hovorů bylo navýšeno generování hovorů o jeden hovor za vteřinu. Z naměřených výsledků a z grafu simulace na obrázku 8.39 vychází, že k prvním výpadkům a nereagování ústředny na nové žádosti dochází v okamžiku 52 souběžných hovorů.



Obrázek 8.39: Simulace souběžných hovorů k ústředně Grandstream UCM 6102

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	30	22,54	51,90	94,29	89,42	91,96	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	0,74	3,85	8,25	7,58	7,86	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	0,31	0,38	0,45	0,42	0,43	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	14,00	20,10	38,00	24,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,11	93,19	93,20	93,20	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11
Called max delta (ms)	30	120,10	136,32	179,32	140,65	159,74	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	17,01	18,79	21,58	19,70	21,30	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	1,96	2,18	2,79	2,54	2,75	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79
Called SDP-RTP delay (ms)	30	140,00	185,53	203,00	198,00	200,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00
100 response delay (ms)	30	11,00	30,37	95,00	68,00	72,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
Answer delay (ms)	30	175,00	342,30	820,00	564,00	652,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00
-24dB delay (ms)	30	634,08	790,17	1229,33	998,18	1071,87	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33
RTCP RTT (ms)	30	36,00	49,67	70,00	59,79	66,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP caller max jitter (ms)	30	17,00	19,50	22,00	21,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP called max jitter (ms)	30	17,33	18,93	21,61	20,03	21,34	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61
Media threads delay (ms)	30	2,05	6,90	15,57	13,30	15,38	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	0,01	0,05	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
GUI thread delay (ms)	30	0,73	77,90	620,00	176,84	378,30	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00

Obrázek 8.40: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Grandstream UCM 6102

Výrobce uvádí že zařízení zvládne 30 souběžných hovorů, což dle naměřených výsledků zvládne bez problémů. Vyhodnocení simulace pro 30 souběžných volání je vyobrazeno na obrázku 8.40. Ústředna zvládne obsloužit 30 volání, ale již dochází k drobným zpožděním při přenosu hlasu. Podrobné výsledky pro 15, 30 a 50 souběžných volání jsou uvedeny v příloze této práce.

9 Zhodnocení

Cílem této diplomové práce bylo zpracovat problematiku vestavěných systémů a zrealizovat jednotlivá měření, z kterých mělo být vyhodnoceno zda je lze využít jako malé pobočkové ústředny v malých firmách. Práce byla rozdělena na čtyři stěžejní části. V úvodní části práce byly zpracovány a popsány základní vlastnosti a důležité parametry vybraných vestavěných systémů, které jsou k dispozici na trhu a lze je v této době získat pro realizaci softwarové ústředny. Na závěr přehledu vestavěných systémů byla zpracována přehledná tabulka s jednotlivými parametry systémů pro snadné porovnání jednotlivých typů.

V druhé části práce byla zpracována problematika internetového volání. Součástí těchto kapitol je popis základních komunikačních protokolů pro VoIP. Pro potřeby této diplomové práce byla zpracována problematika protokolu SIP a RTP. Následně byla zpracována problematika softwarových ústředen, jejich vlastnosti a použití. Konkrétně se zaměřením na softwarovou ústřednu Asterisk.

Problematika testovacího softwaru a způsob testování jednotlivých zařízení byla zpracována ve třetí části této práce. Jako testovací software byl využit software SIPp, který je důkladně popsán včetně jeho vlastností, možností nastavení a spuštění simulace. Pro účely zatížení komunikačních kanálů souvislým datovým tokem byl vybrán program iPerf. Základní vlastnosti programu a ovládání programu iPerf byly zpracovány a následně využity pro simulační testy. Poslední testovací software popsán v této diplomové práci je program SIP Tester, který byl používán jako doplněk k simulačním testům při hodnocení kvality přenášeného audio streamu.

Součástí praktické části práce je návrh testovacích scénářů pro jednotlivé simulace telefonního provozu. Byly navrženy tři testovací scénáře, které simulují reálný provoz pro ústřednu. První scénář umožňoval simulovat registraci telefonních přístrojů k ústředně. Druhý scénář realizoval volání mezi dvěma účastníky po dobu trvání devadesáti vteřin jednoho hovoru. Tento scénář byl navržený tak, aby ústředna zajišťovala přenos signalizace i hlasu. Poslední scénář byl navržen tak, aby ústředna přijala hovor, zrealizovala spojení a následně přenos hlasu byl realizován na přímo mezi volanými. Ústředna tímto dokáže zpracovat více volání, jelikož není zatěžována přenášeným audio streamem.

Výsledky simulací byly získány jednotlivými testy a opakováním pro vyloučení náhodných veličin. Simulacemi bylo zjištěno pro systém Raspberry Pi 2 Model B, že zvládne odbavit přibližně 150 registračních žádostí za vteřinu. Pro tento scénář bylo měření opakováno, kdy ústředna byla zatěžována současně programem iPerf. Výsledky při tomto zatížení byly takřka stejné a tedy nedocházelo k zásadnímu ovlivnění měření a dále nebyl program iPerf využit. Při použití dalších scénářů bylo dosaženo při přenosu médií skrz ústřednu nejvíce 65 současných hovorů. Tato hodnota je velmi optimistická a nebere v úvahu kvalitu přenášeného hlasu. Při zhodnocení kvality RTP streamu bylo zjištěno, že ústředna zvládne v garantované kvalitě dle doporučení maximálně 25 souběžných hovorů. Při využití scénáře s přenosem médií mimo ústřednu je schopna ústředna zrealizovat signalizaci pro přibližně 210 současných hovorů. Zároveň byl zaznamenán vliv jiného operačního systému. Vliv OS je nepatrný a projevuje se

zhoršením odezvy ústředny na SIP zprávy. Při porovnání výsledků pro jednotlivé operační systémy byl lépe vyhodnocen OS Ubuntu pro platformu Raspberry Pi 2 Model B.

Druhým vestavěným systémem, který byl testován, byl Orange Pi Pc. Pro tento systém bylo dosaženo následujících výsledků. Při registraci telefonních přístrojů dokáže ústředna odbavit bez problému 160 žádostí za vteřinu, ale k plnému vytížení dochází až při 210 žádostech za vteřinu. V rozmezí od 160 do 210 žádostí za vteřinu dochází nahodile k nutnosti znovu odesílání žádostí. Při realizaci hovorů s přenosem médií prostřednictvím ústředny zvládne dle získaných výsledku obsloužit 73 současných hovorů. Bohužel tato hodnota je stejně jako v případě Raspberry Pi maximální a nebere v úvahu kvalitu přenášeného RTP streamu. Následně opakovanou simulací programem SIP Tester bylo zjištěno, že ústředna v systému Orange Pi Pc dokáže zrealizovat více jak 30 současných hovorů. Při dalším zvyšování na hodnotu 40 současných hovorů již není zaručena dostatečná kvalita přenosu audio streamu. V případě simulace, kdy ústředna zprostředkovává pouze signalizaci je schopna obsloužit 220 souběžných volání. Jako u předchozího vestavěného systému i zde byl porovnán vliv OS na naměřené výsledky. I v tomto případě byl jako lepší OS vyhodnocen operační systém Ubuntu.

Na závěr simulací díky zapůjčení malé pobočkové ústředny Grandstream UCM 6102 od společnosti UPC Česká republika s.r.o. bylo realizováno měření na malé komerčně dostupné ústředně, která je nasazována v praxi a má velmi podobné hardwarové parametry jako zde zmíněné vestavěné systémy. Na tuto ústřednu byly aplikovány stejné testy jako na předchozí vestavěné systémy. Simulací bylo zjištěno, že ústředna dokáže zpracovat maximálně 45 registračních žádostí za vteřinu. Při simulaci hovorů s přenosem médií prostřednictvím ústředny je tato ústředna schopna obsloužit 52 současných hovorů. Tato hodnota je opět bez sledování kvality přenosu RTP streamu. Při analýze kvality přenosu audio streamu bylo zjištěno, že ústředna zvládne odbavit 30 současných hovorů i více, maximálně však okolo 40 hovorů. Výrobce uvádí jako maximální počet souběžných hovorů 30, což bylo těmito simulacemi potvrzeno. Oproti vestavěným systémům má toto zařízení nespornou výhodou, kdy je přímo vyráběno pro tyto účely a nabízí lepší konektivitu. Zařízení je dodáváno v plastovém krytu s uživatelsky přívětivým designem.

Porovnáním jednotlivých testovaných systémů bylo zjištěno, že lze tyto vestavěné systémy využít jako malé pobočkové ústředny pro přibližně 30 až 40 telefonních přístrojů, což je pro malou firmu naprosto dostačující. V případě nasazení do reálného prostředí je zapotřebí vyřešit problém vestavěných systémů s úložištěm pro operační systém. Jako paměť lze využít USB zařízení, případně některé vestavěné systémy nabízí vlastní interní úložiště eMMC. Zařízení Grandstream UCM 6102 je zde popsáno a využito pouze jako dodatečné pro získání simulačních výsledků. Při ověření a porovnání získaných dat lze tyto zařízení porovnávat, jelikož mají stejné parametry a stejnou procesorovou architekturu. Zařízení Grandstream UCM 6102 zvládne stejné množství hovorů jako zde zmíněné vestavěné systémy, ale jelikož se jedná o komerční přístroj přímo pro tuto aplikaci jeho cena dosahuje více jak desetinásobku ceny vestavěných systémů.

Seznam zkratek

- ARM** Acorn RISC Machine. 10–17,
B2BUA Back to Back User Agent. 21, 26,
CSV Comma-Separated Values. 32, 33,
DDR3 Double Data Rate type 3. 11–16, 18,
eMMC embedded MultiMediaCard. 12, 15, 67,
GNU GNU General Public License. 23, 26,
GPIO General-purpose input/output. 10, 11, 15,
HDMI High-Definition Multi-media Interface. 9–16,
HTTP Hypertext Transfer Protocol. 19,
IETF Internet Engineering Task Force. 19,
IP Internet Protocol. 8, 17, 19, 22, 23, 38,
ITU International Telecommunication Union. 22,
ITU-T International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector. 19, 22,
IVR Interactive Voice Response. 23,
MOS Mean Opinion Score. 22,
NAS Network-attached Storage. 13,
NAT Network Address Translation. 21, 24,
OS Operační Systém. 10, 14, 38, 41, 44, 48, 49, 52, 56, 66, 67, , 98
PID Process ID. 33,
PSTN Public Switched Telephone Network. 23,
QoS Quality of Service. 22,
RAM Random Access memory. 9, 10, 12–16,
RFC Request for Comments. 19, 21,
RISC Reduced Instruction Set Computing. 68,
RTCP Real-time Transport Control Protocol. 21, 22,
RTP Real-time Transport Protocol. 5, 6, 19, 21–23, 25, 26, 32, 33, 35, 37, 41, 42, 44, 54, 56, 66, 67, 92, 96, , 98
SATA Serial Advanced Technology Attachment. 11, 12, 14,
SCCP Skinny Call Control Protocol. 23,
SCTP Stream Control Transmission Protocol. 26,
SDP Session Description Protocol. 19,
SIP Session Initialization Protocol. 5, 6, 8, 19–21, 23, 24, 26, 28–30, 32, 36, 37, 62, 66, 67, 69, 71, 75, 86,
SRTP Secure Real-time Transport Protocol. 21,
TCP Transmission Control Protocol. 8, 19, 29, 37, 50,
TLS Transport Layer Security. 19, 26,
UDP User Datagram Protocol. 8, 19, 22, 29,
USB Universal Serial Bus. 9–12, 14–16,
VoIP Voice over Internet Protocol. 5, 6, 19, 23, 66,
Wi-Fi Wi-Fi. 11, 12, 18,

Seznam obrázků

2.1	RaspberryPi 2 Model B – pohled shora.	10
2.2	RaspberryPi 2 Model B - spodní strana.	10
2.3	Banana Pi BPI-M1+.[2]	11
2.4	Banana Pi BPI-M2 Quad-core.[3]	12
2.5	Banana Pi BPI-M3 Octa-core.[4]	12
2.6	Popis rozhraní Orange Pi PC.[5]	13
2.7	Popis rozhraní Orange Pi One.[6]	14
2.8	Beaglebone Black.[7]	15
2.9	Vestavěný systém UP.[8]	16
2.10	Pine A64+.[9]	16
2.11	Grandstream UCM 6104 [10]	17
3.1	Průběh signalizace telefonního hovoru pomocí SIP protokolu.[11]	20
3.2	Struktura RTP paketu.[13]	22
5.1	Průběh testování SIPp - průběžné statistiky.	27
5.2	Výsledky simulace SIPp.	27
5.3	Průběh signalizace scénáře SIPp UAC s médii [16]	28
5.4	Ukázka výpisu programu iPerf	30
5.5	Ukázka výpisu současných hovorů v programu SIP Tester - přehled RTP	30
5.6	Nastavení odchozích hovorů v programu SIP Tester	31
6.1	Průběh signalačních zpráv registrace telefonních přístrojů k ústředně	32
6.2	Schéma zapojení testu registrace telefonních přístrojů	33
6.3	Schéma signalizace hovoru s médii	34
6.4	Schéma zapojení testu hovorů včetně přenosu hlasu	34
6.5	Signalační schéma průběhu hovoru bez přenosu médií	35
6.6	Schéma zapojení testů s přímými médii	36
8.1	Registrace klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	39
8.2	Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	40
8.3	Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	40
8.4	Registrace klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	41
8.5	Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	42
8.6	Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	42
8.7	Simulace souběžných hovorů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	43
8.8	Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	43
8.9	Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	44
8.10	Simulace souběžných hovorů k ústředně Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	45

8.11	Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	45
8.12	Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	46
8.13	Simulace hovorů s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	47
8.14	Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	47
8.15	Využití systémových prostředků při přímém přenosu médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	48
8.16	Simulace hovorů s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	49
8.17	Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	49
8.18	Využití systémových prostředků při přímém přenosu médií Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	50
8.19	Registrace klientů k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Ubuntu	51
8.20	Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Ubuntu	51
8.21	Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Orange Pi Pc - OS Ubuntu	52
8.22	Registrace klientů k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Debian	52
8.23	Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Orange Pi 2 Pc - OS Debian	53
8.24	Využití systémových prostředků pro registraci klientů k ústředně Orange Pi Pc - OS Debian	53
8.25	Simulace souběžných hovorů k ústředně Orange Pi - OS Ubuntu	54
8.26	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi 2 - OS Ubuntu	55
8.27	Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Orange Pi - OS Ubuntu	56
8.28	Simulace souběžných hovorů k ústředně Orange Pi - OS Debian	57
8.29	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi 2 - OS Debian	57
8.30	Využití systémových prostředků při hovorech s ústřednou Orange Pi - OS Debian	58
8.31	Simulace hovorů s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Ubuntu	59
8.32	Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Ubuntu	59
8.33	Využití systémových prostředků při přímém přenosu médií Orange Pi Pc - OS Ubuntu	60
8.34	Simulace hovorů s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Debian	61
8.35	Odezva ústředny na zprávu INVITE s přímým přenosem médií Orange Pi Pc - OS Debian	61
8.36	Využití systémových prostředků při přímém přenosu médií Orange Pi Pc - OS Debian	62
8.37	Registrace klientů k ústředně Grandstream UCM 6102	63

8.38	Odezva ústředny na registrační žádosti k ústředně Grandstream UCM 6102	63
8.39	Simulace souběžných hovorů k ústředně Grandstream UCM 6102	64
8.40	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Grandstream UCM 6102	64
G.1	Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	88
G.2	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	88
G.3	Vyhodnocení simulace 25 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian	89
G.4	Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	90
G.5	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	90
G.6	Vyhodnocení simulace 25 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu	91
H.1	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Ubuntu	92
H.2	Vyhodnocení simulace 35 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Ubuntu	93
H.3	Vyhodnocení simulace 45 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Ubuntu	93
H.4	Vyhodnocení simulace 25 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Debian	94
H.5	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Debian	95
H.6	Vyhodnocení simulace 45 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Debian	95
I.1	Vyhodnocení simulace 15 současných hovorů Grandstream UCM 6102	96
I.2	Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Grandstream UCM 6102	96
I.3	Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Grandstream UCM 6102	97

Seznam tabulek

2.1	Přehled vybraných parametrů vestavěných systémů.	18
-----	--	----

Seznam ukázek kódů

3.1	Ukázka SIP protokolu	19
4.1	Základní konfigurace souboru asterisk.conf	24
4.2	Konfigurační soubor sip.conf	24
4.3	Konfigurační soubor extensions.conf	25
5.1	Instalace podpůrných knihoven pro program SIPp	27
5.2	Instalace programu SIPp	28
5.3	Konfigurace XML scénáře [16]	28
5.4	Příkaz pro spuštění SIPp	29
5.5	Spuštění programu iPerf	29
6.1	Spuštění testovacího scénáře reg.xml	33
6.2	Přihlášení klientů na straně UAS pomocí reg.xml	35
6.3	Spuštění režimu UAS	35
6.4	Spuštění režimu UAC	35

6.5	Spuštění testovacího scénáře s přímým přenosem médií	36
B.1	XML scénář registrace telefonních přístrojů	76
C.2	Scénář pro stanici UAC s přenosem médií	77
C.3	Scénář pro stanici UAS s přenosem médií	78
D.4	Scénář pro stanici UAC s přímým přenosem médií	80
D.5	Scénář pro stanici UAS s přímým přenosem médií	82
E.6	CSV soubor uživatelů UAC	84
E.7	CSV soubor uživatelů UAS	85
F.8	Soubor nastavení ústředny sip.conf	86
F.9	Soubor nastavení ústředny extension.conf	87

Reference

- [1] Raspberry Pi 2 Model B. [online]. [cit. 2015-11-07].
Dostupné z: [<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>](https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/)
- [2] Banana PI BPI - M1+ Dual-Core Computer Upgrade. [online]. [cit. 2015-11-07].
Dostupné z: [<http://www.banana-pi.org/m1plus.html>](http://www.banana-pi.org/m1plus.html)
- [3] Banana PI BPI - M2 Quad-Core Computer. [online]. [cit. 2015-11-07].
Dostupné z: [<http://www.banana-pi.org/m2.html>](http://www.banana-pi.org/m2.html)
- [4] Banana PI BPI - M3 Octa-Core Computer. [online]. [cit. 2015-11-07].
Dostupné z: [<http://www.banana-pi.org/m3.html>](http://www.banana-pi.org/m3.html)
- [5] Orange Pi PC - Orange Pi. [online]. [cit. 2016-01-06].
Dostupné z: [<http://www.orangepi.org/orangepipc/>](http://www.orangepi.org/orangepipc/)
- [6] Orange Pi One - Orange Pi. [online]. [cit. 2016-02-02].
Dostupné z: [<http://www.orangepi.org/orangepione/>](http://www.orangepi.org/orangepione/)
- [7] BeagleBoard.org - Black. [online]. [cit. 2016-02-02].
Dostupné z: [<http://beagleboard.org/black>](http://beagleboard.org/black)
- [8] Up Board |Power Up Your Ideas! [online]. [cit. 2015-11-12], 2015.
Dostupné z: [<http://www.up-board.org>](http://www.up-board.org)
- [9] PINE64 - PINE 64. [online]. [cit. 2016-02-03].
Dostupné z: [<https://www.pine64.com/product/#features>](https://www.pine64.com/product/#features)
- [10] UCM6100 series | Grandstream Networks. [online]. [cit. 2016-05-11].
Dostupné z: [<http://www.grandstream.com/products/ip-pbxs/ucm-series-ip-pbxs/product/ucm6100-series>](http://www.grandstream.com/products/ip-pbxs/ucm-series-ip-pbxs/product/ucm6100-series)
- [11] RFC3261 - SIP: Session Initiation Protocol. In *SIP: Session Initiation Protocol*, 2002.
Dostupné z: [<https://tools.ietf.org/pdf/rfc3261.pdf>](https://tools.ietf.org/pdf/rfc3261.pdf)
- [12] RFC3550 - RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. In *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*, 2003.
Dostupné z: [<https://tools.ietf.org/html/rfc3550>](https://tools.ietf.org/html/rfc3550)
- [13] Hosmer, C.: Protocol Data Hiding. [online]. [cit. 2016-03-21], 2012.
Dostupné z: [<http://www.forensicmag.com/articles/2012/03/protocol-data-hiding>](http://www.forensicmag.com/articles/2012/03/protocol-data-hiding)
- [14] Asterisk.org: What is Asterisk? | Getting Started | Open Source Asterisk. [online]. [cit. 2016-03-11], 2016.
Dostupné z: [<http://www.asterisk.org/get-started>](http://www.asterisk.org/get-started)
- [15] Asterisk.org: Asterisk Command Line Interface - Asterisk Project - Asterisk Project Wiki. [online]. [cit. 2016-03-21], 2016.
Dostupné z: [<https://wiki.asterisk.org/wiki/display/AST/Asterisk+Command+Line+Interface>](https://wiki.asterisk.org/wiki/display/AST/Asterisk+Command+Line+Interface)
- [16] Robert Day, O. J.: SIPp reference Documentation. [online]. [cit. 2016-03-21], 2014.
Dostupné z: [<http://sipp.sourceforge.net/doc/reference.html>](http://sipp.sourceforge.net/doc/reference.html)
- [17] StartTrinity.com: StarTrinity SIP Tester™ (call generator) - VoIP monitoring and testing tool. [online]. [cit. 2016-04-27], 2016.
Dostupné z: [<http://startrinity.com/VoIP/SipTester/SipTester.aspx>](http://startrinity.com/VoIP/SipTester/SipTester.aspx)
- [18] iPerf: iPerf - The TCP, UDP and SCTP network bandwidth measurement tool. [online]. [cit. 2016-04-27], 2016.
Dostupné z: [<https://iperf.fr>](https://iperf.fr)

Seznam příloh

- Příloha A** - Základní příkazy Asterisk konzole
- Příloha B** - Testovací scénář REGISTER
- Příloha C** - Testovací scénář INVITE s RTP
- Příloha D** - Testovací scénář INVITE s přímým přenosem médií
- Příloha E** - Konfigurační soubory CSV
- Příloha F** - Nastavení ústředny Asterisk
- Příloha G** - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Raspberry Pi 2 Model B
- Příloha H** - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Orange Pi Pc
- Příloha I** - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Grandstream UCM 6102
- Příloha J** - Obsah přiloženého CD

Postup instalace ústředny Asterisk na operační systém Ubuntu:

```
# sudo apt-get update
# sudo apt-get install build-essential
# cd /usr/src/
# wget http://downloads.asterisk.org/pub/telephony/asterisk/asterisk-13-current.tar.gz
# tar -xzf asterisk-13-current.tar.gz
# cd asterisk-13.0.0/
# ./contrib/scripts/install_prereq install
# ./bootstrap.sh
# ./configure
# make && make install
# make samples
# sudo make config
# asterisk
```

Příkazy využívané pro obsluhu konzole Asterisk využité v této práci jsou:

- **sip reload** - pro znovu načtení konfigurace SIP
- **sip show peers** - zobrazení jednotlivých uživatelů a zda jsou registrováni a na jaké adrese a portu
- **sip show channels** - zobrazení aktivní kanálů SIP
- **core show calls** - zobrazení aktuálního počtu volání na ústředně a celkového počtu
- **core stop now** - vypnutí ústředny Asterisk
- **channel request hangup all** - pro ukončení všech aktivních spojení po proběhnutí simulace, kdy se poslední generované žádosti neukončili korektně kvůli přetížení

Testovací scénář pro registraci telefonních přístrojů v programu SIPp:

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-2"?>
<!DOCTYPE scenario SYSTEM "sipp.dtd">
<scenario name="REGISTER">

<send retrans="500" start_rtd="zasl401">
  <![CDATA[

    REGISTER sip:[remote_ip] SIP/2.0
    Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
    From:"[field0]" <sip:[field0]@[field1]>;tag=[call_number]
    To: "[field0]" <sip:[field0]@[field1]:[local_port]>
    Call-ID: [call_id]
    CSeq: 1 REGISTER
    Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
    Max-Forwards: 70
    Expires: 360000
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<recv response="100" optional="true">
</recv>

<recv response="401" auth="true" rtd="zasl401">
</recv>

<send retrans="500" start_rtd="odp200">
  <![CDATA[

    REGISTER sip:[remote_ip] SIP/2.0
    Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
    From: <sip:[field0]@[field1]>;tag=[call_number]
    To: <sip:[field0]@[field1]>
    Call-ID: [call_id]
    CSeq: 2 REGISTER
    Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
    [field2]
    Expires: 360000
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<recv response="200" auth="true" rtd="odp200">
</recv>

  <ResponseTimeRepartition value="10, 20"/>

  <CallLengthRepartition value="10"/>

</scenario>
```

Ukázka kódu B.1: XML scénář registrace telefonních přístrojů

Scénář pro stanici UAC s přenosem médií:

```

<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<!DOCTYPE scenario SYSTEM "sipp.dtd">

<scenario name="UAC with media">
  <send retrans="500" start_rtd="inv">
    <![CDATA[

      INVITE sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
      Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
      From: <sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
      To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>
      Call-ID: [call_id]
      CSeq: 1 INVITE
      Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
      Max-Forwards: 70
      Subject: Performance Test
      Content-Type: application/sdp
      Content-Length: [len]

      v=0
      o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      s=-
      c=IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      t=0 0
      m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
      a=rtpmap:8 PCMA/8000
      a=rtpmap:101 telephone-event/8000
      a=fmtp:101 0-11,16

    ]]>
  </send>

  <recv response="401" auth="true" crlf="true">
</recv>
  <send retrans="500">
    <![CDATA[

      INVITE sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
      Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
      From: <sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
      To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>
      Call-ID: [call_id]
      CSeq: 2 INVITE
      Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
      [field2]
      Max-Forwards: 70
      Subject: Performance Test
      Content-Type: application/sdp
      Content-Length: [len]

      v=0
      o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      s=-
      c=IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      t=0 0
      m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
      a=rtpmap:8 PCMA/8000
      a=rtpmap:101 telephone-event/8000
      a=fmtp:101 0-11,16

    ]]>
  </send>

  <recv response="100" crlf="true" optional="true">
</recv>
  <recv response="180" crlf="true" optional="true">
</recv>

```

```

<recv response="200" rtd="inv" crlf="true" rrs="true">
</recv>
<send>
  <![CDATA[

    ACK sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
    Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
    From: <sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
    To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>[peer_tag_param]
    Call-ID: [call_id]
    CSeq: 2 ACK
    Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
    Max-Forwards: 70
    Subject: Performance Test
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>
<nop>
  <action>
    <exec play_pcap_audio="pcap/g711a_90.pcap"/>
  </action>
</nop>

<pause milliseconds="90000"/>
<send retrans="500">
  <![CDATA[

    BYE sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
    Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
    From:<sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
    To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>[peer_tag_param]
    Call-ID: [call_id]
    CSeq: 3 BYE
    Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
    Max-Forwards: 70
    Subject: Performance Test
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<recv response="200" crlf="true">
</recv>

<ResponseTimeRepartition value="10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200"/>
<CallLengthRepartition value="10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000"/>
</scenario>

```

Ukázka kódu C.2: Scénář pro stanici UAC s přenosem médií

Scénář pro klienta UAS s médii :

```

<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<!DOCTYPE scenario SYSTEM "sipp.dtd">
<scenario name="UAS responder with pcap">

  <recv request="INVITE" crlf="true" start_rtd="inv_uas">
  </recv>
  <send>
    <![CDATA[

      SIP/2.0 180 Ringing
      [last_Via:]
      [last_From:]
      [last_To:];tag=[call_number]
      [last_Call-ID:]
    ]]>
  </send>

```

```
[last_CSeq:]
Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
Content-Length: 0

]]>
</send>
<pause milliseconds="1000" />
<send retrans="500" rtd="inv_uas">
  <![CDATA[

    SIP/2.0 200 OK
    [last_Via:]
    [last_From:]
    [last_To:];tag=[call_number]
    [last_Call-ID:]
    [last_CSeq:]
    Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
    Content-Type: application/sdp
    Content-Length: [len]

    v=0
    o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
    s=-
    c=IN IP[media_ip_type] [media_ip]
    t=0 0
    m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
    a=rtpmap:8 PCMA/8000
    a=rtpmap:101 telephone-event/8000
    a=fmtp:101 0-11,16

  ]]>
</send>
<recv request="ACK" crlf="true">
</recv>
<nop>
  <action>
    <exec play_pcap_audio="pcap/g711a_90.pcap"/>
  </action>
</nop>

<recv request="BYE">
</recv>

<send>
  <![CDATA[

    SIP/2.0 200 OK
    [last_Via:]
    [last_From:]
    [last_To:]
    [last_Call-ID:]
    [last_CSeq:]
    Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<pause milliseconds="4000" />
<ResponseTimeRepartition value="10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200"/>

<CallLengthRepartition value="10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000"/>
</scenario>
```

Ukázka kódu C.3: Scénář pro stanici UAS s přenosem médií

Scénář pro klienta UAC:

```

<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<!DOCTYPE scenario SYSTEM "sipp.dtd">

<scenario name="UAC with media">
  <send retrans="500" start_rtd="inv">
    <![CDATA[

      INVITE sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
      Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
      From: <sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
      To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>
      Call-ID: [call_id]
      CSeq: 1 INVITE
      Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
      Max-Forwards: 70
      Subject: Performance Test
      Content-Type: application/sdp
      Content-Length: [len]

      v=0
      o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      s=-
      c=IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      t=0 0
      m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
      a=rtpmap:8 PCMA/8000
      a=rtpmap:101 telephone-event/8000
      a=fmtp:101 0-11,16

    ]]>
  </send>

  <recv response="401" auth="true" crlf="true">
</recv>
  <send retrans="500">
    <![CDATA[

      INVITE sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
      Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
      From: <sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
      To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>
      Call-ID: [call_id]
      CSeq: 2 INVITE
      Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
      [field2]
      Max-Forwards: 70
      Subject: Performance Test
      Content-Type: application/sdp
      Content-Length: [len]

      v=0
      o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      s=-
      c=IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      t=0 0
      m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
      a=rtpmap:8 PCMA/8000
      a=rtpmap:101 telephone-event/8000
      a=fmtp:101 0-11,16

    ]]>
  </send>

  <recv response="100" crlf="true" optional="true">
</recv>
  <recv response="180" crlf="true" optional="true">
</recv>

```

```

<recv response="200" rtd="inv" crlf="true" rrs="true">
</recv>
<send>
  <![CDATA [

    ACK sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
    Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
    From: <sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
    To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>[peer_tag_param]
    Call-ID: [call_id]
    CSeq: 2 ACK
    Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
    Max-Forwards: 70
    Subject: Performance Test
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<recv request="INVITE"/>

<send>
  <![CDATA [

    SIP/2.0 200 OK
    [last_To:]
    [last_From:]
    [last_Call-ID:]
    [last_CSeq:]
    [last_Via:]
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<recv request="ACK"/>
<recv request="INVITE"/>

<send>
  <![CDATA [

    SIP/2.0 200 OK
    [last_To:]
    [last_From:]
    [last_Call-ID:]
    [last_CSeq:]
    [last_Via:]
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<recv request="ACK"/>
<nop>
  <action>
    <exec play_pcap_audio="pcap/g711a_90.pcap"/>
  </action>
</nop>

<pause milliseconds="90000"/>
<send retrans="500">
  <![CDATA [

    BYE sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port] SIP/2.0
    Via: SIP/2.0/[transport] [local_ip]:[local_port];branch=[branch]
    From:<sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]>;tag=[call_number]
    To: <sip:[field3]@[remote_ip]:[remote_port]>[peer_tag_param]
    Call-ID: [call_id]
    CSeq: 3 BYE
    Contact: sip:[field0]@[local_ip]:[local_port]
    Max-Forwards: 70
    Subject: Performance Test
  ]]>

```

```

Content-Length: 0

]]>
</send>

<recv response="200" crlf="true">
</recv>

<ResponseTimeRepartition value="10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200"/>

<CallLengthRepartition value="10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000"/>

</scenario>

```

Ukázka kódu D.4: Scénář pro stanici UAC s přímým přenosem médií

Scénář pro klienta UAS:

```

<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<!DOCTYPE scenario SYSTEM "sipp.dtd">

<scenario name="UAS responder with pcap">

  <recv request="INVITE" crlf="true" start_rtd="inv_uas">
  </recv>
  <send>
    <![CDATA[

      SIP/2.0 180 Ringing
      [last_Via:]
      [last_From:]
      [last_To:];tag=[call_number]
      [last_Call-ID:]
      [last_CSeq:]
      Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
      Content-Length: 0

    ]]>
  </send>
  <pause milliseconds="1000" />
  <send retrans="500" rtd="inv_uas">
    <![CDATA[

      SIP/2.0 200 OK
      [last_Via:]
      [last_From:]
      [last_To:];tag=[call_number]
      [last_Call-ID:]
      [last_CSeq:]
      Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
      Content-Type: application/sdp
      Content-Length: [len]

      v=0
      o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
      s=-
      c=IN IP[media_ip_type] [media_ip]
      t=0 0
      m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
      a=rtpmap:8 PCMA/8000
      a=rtpmap:101 telephone-event/8000
      a=fmtp:101 0-11,16

    ]]>
  </send>

  <recv request="ACK" crlf="true">
  </recv>

```

```

<nop>
  <action>
    <exec play_pcap_audio="pcap/g711a_90.pcap"/>
  </action>
</nop>
<recv request="INVITE"/>

<send>
  <![CDATA [

    SIP/2.0 200 OK
    [last_To:]
    [last_From:]
    [last_Call-ID:]
    [last_CSeq:]
    [last_Via:]
    Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
    Content-Type: application/sdp
    Content-Length: [len]

    v=0
    o=user1 53655765 2353687637 IN IP[local_ip_type] [local_ip]
    s=-
    c=IN IP[media_ip_type] [media_ip]
    t=0 0
    m=audio [auto_media_port] RTP/AVP 8
    a=rtpmap:8 PCMA/8000
    a=rtpmap:101 telephone-event/8000
    a=fmtp:101 0-11,16
  ]]>
</send>

<recv request="ACK"/>

<recv request="BYE">
</recv>

<send>
  <![CDATA [

    SIP/2.0 200 OK
    [last_Via:]
    [last_From:]
    [last_To:]
    [last_Call-ID:]
    [last_CSeq:]
    Contact: <sip:[local_ip]:[local_port];transport=[transport]>
    Content-Length: 0

  ]]>
</send>

<pause milliseconds="4000" />
<ResponseTimeRepartition value="10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200"/>

<CallLengthRepartition value="10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000"/>
</scenario>

```

Ukázka kódu D.5: Scénář pro stanici UAS s přímým přenosem médií

Konfigurace uživatelů pro generování hovorů na straně UAC:

```
SEQUENTIAL
1001      192.168.1.13      [authentication username=1001 password=123456] 1051
1002      192.168.1.13      [authentication username=1002 password=123456] 1052
1003      192.168.1.13      [authentication username=1003 password=123456] 1053
1004      192.168.1.13      [authentication username=1004 password=123456] 1054
1005      192.168.1.13      [authentication username=1005 password=123456] 1055
1006      192.168.1.13      [authentication username=1006 password=123456] 1056
1007      192.168.1.13      [authentication username=1007 password=123456] 1057
1008      192.168.1.13      [authentication username=1008 password=123456] 1058
1009      192.168.1.13      [authentication username=1009 password=123456] 1059
1010      192.168.1.13      [authentication username=1010 password=123456] 1060
1011      192.168.1.13      [authentication username=1011 password=123456] 1061
1012      192.168.1.13      [authentication username=1012 password=123456] 1062
1013      192.168.1.13      [authentication username=1013 password=123456] 1063
1014      192.168.1.13      [authentication username=1014 password=123456] 1064
1015      192.168.1.13      [authentication username=1015 password=123456] 1065
1016      192.168.1.13      [authentication username=1016 password=123456] 1066
1017      192.168.1.13      [authentication username=1017 password=123456] 1067
1018      192.168.1.13      [authentication username=1018 password=123456] 1068
1019      192.168.1.13      [authentication username=1019 password=123456] 1069
1020      192.168.1.13      [authentication username=1020 password=123456] 1070
1021      192.168.1.13      [authentication username=1021 password=123456] 1071
1022      192.168.1.13      [authentication username=1022 password=123456] 1072
1023      192.168.1.13      [authentication username=1023 password=123456] 1073
1024      192.168.1.13      [authentication username=1024 password=123456] 1074
1025      192.168.1.13      [authentication username=1025 password=123456] 1075
1026      192.168.1.13      [authentication username=1026 password=123456] 1076
1027      192.168.1.13      [authentication username=1027 password=123456] 1077
1028      192.168.1.13      [authentication username=1028 password=123456] 1078
1029      192.168.1.13      [authentication username=1029 password=123456] 1079
1030      192.168.1.13      [authentication username=1030 password=123456] 1080
1031      192.168.1.13      [authentication username=1031 password=123456] 1081
1032      192.168.1.13      [authentication username=1032 password=123456] 1082
1033      192.168.1.13      [authentication username=1033 password=123456] 1083
1034      192.168.1.13      [authentication username=1034 password=123456] 1084
1035      192.168.1.13      [authentication username=1035 password=123456] 1085
1036      192.168.1.13      [authentication username=1036 password=123456] 1086
1037      192.168.1.13      [authentication username=1037 password=123456] 1087
1038      192.168.1.13      [authentication username=1038 password=123456] 1088
1039      192.168.1.13      [authentication username=1039 password=123456] 1089
1040      192.168.1.13      [authentication username=1040 password=123456] 1090
1041      192.168.1.13      [authentication username=1041 password=123456] 1091
1042      192.168.1.13      [authentication username=1042 password=123456] 1092
1043      192.168.1.13      [authentication username=1043 password=123456] 1093
1044      192.168.1.13      [authentication username=1044 password=123456] 1094
1045      192.168.1.13      [authentication username=1045 password=123456] 1095
1046      192.168.1.13      [authentication username=1046 password=123456] 1096
1047      192.168.1.13      [authentication username=1047 password=123456] 1097
1048      192.168.1.13      [authentication username=1048 password=123456] 1098
1049      192.168.1.13      [authentication username=1049 password=123456] 1099
1050      192.168.1.13      [authentication username=1050 password=123456] 1100
```

Ukázka kódu E.6: CSV soubor uživatelů UAC

Seznam uživatelů v *CSV* souboru pro registraci na straně UAS:

```
SEQUENTIAL
1051      192.168.1.13      [authentication username=1051 password=123456]
1052      192.168.1.13      [authentication username=1052 password=123456]
1053      192.168.1.13      [authentication username=1053 password=123456]
1054      192.168.1.13      [authentication username=1054 password=123456]
1055      192.168.1.13      [authentication username=1055 password=123456]
1056      192.168.1.13      [authentication username=1056 password=123456]
1057      192.168.1.13      [authentication username=1057 password=123456]
1058      192.168.1.13      [authentication username=1058 password=123456]
1059      192.168.1.13      [authentication username=1059 password=123456]
1060      192.168.1.13      [authentication username=1060 password=123456]
1061      192.168.1.13      [authentication username=1061 password=123456]
1062      192.168.1.13      [authentication username=1062 password=123456]
1063      192.168.1.13      [authentication username=1063 password=123456]
1064      192.168.1.13      [authentication username=1064 password=123456]
1065      192.168.1.13      [authentication username=1065 password=123456]
1066      192.168.1.13      [authentication username=1066 password=123456]
1067      192.168.1.13      [authentication username=1067 password=123456]
1068      192.168.1.13      [authentication username=1068 password=123456]
1069      192.168.1.13      [authentication username=1069 password=123456]
1070      192.168.1.13      [authentication username=1070 password=123456]
1071      192.168.1.13      [authentication username=1071 password=123456]
1072      192.168.1.13      [authentication username=1072 password=123456]
1073      192.168.1.13      [authentication username=1073 password=123456]
1074      192.168.1.13      [authentication username=1074 password=123456]
1075      192.168.1.13      [authentication username=1075 password=123456]
1076      192.168.1.13      [authentication username=1076 password=123456]
1077      192.168.1.13      [authentication username=1077 password=123456]
1078      192.168.1.13      [authentication username=1078 password=123456]
1079      192.168.1.13      [authentication username=1079 password=123456]
1080      192.168.1.13      [authentication username=1080 password=123456]
1081      192.168.1.13      [authentication username=1081 password=123456]
1082      192.168.1.13      [authentication username=1082 password=123456]
1083      192.168.1.13      [authentication username=1083 password=123456]
1084      192.168.1.13      [authentication username=1084 password=123456]
1085      192.168.1.13      [authentication username=1085 password=123456]
1086      192.168.1.13      [authentication username=1086 password=123456]
1087      192.168.1.13      [authentication username=1087 password=123456]
1088      192.168.1.13      [authentication username=1088 password=123456]
1089      192.168.1.13      [authentication username=1089 password=123456]
1090      192.168.1.13      [authentication username=1090 password=123456]
1091      192.168.1.13      [authentication username=1091 password=123456]
1092      192.168.1.13      [authentication username=1092 password=123456]
1093      192.168.1.13      [authentication username=1093 password=123456]
1094      192.168.1.13      [authentication username=1094 password=123456]
1095      192.168.1.13      [authentication username=1095 password=123456]
1096      192.168.1.13      [authentication username=1096 password=123456]
1097      192.168.1.13      [authentication username=1097 password=123456]
1098      192.168.1.13      [authentication username=1098 password=123456]
1099      192.168.1.13      [authentication username=1099 password=123456]
1100      192.168.1.13      [authentication username=1100 password=123456]
```

Ukázka kódu E.7: CSV soubor uživatelů UAS

Ústředna Asterisk byla nainstalována ve výchozí konfiguraci a byl nakonfigurován protokol SIP a vytáčený plán pro účely testů ústředny.

Soubor sip.conf:

```
[general]
context=internal
allowguest=yes
allowoverlap=no
bindport=5060
bindaddr=0.0.0.0
srvlookup=no
directmedia=yes    /// proměnná hodnota podle typu testovacího scénáře
directrtpsetup=yes /// proměnná hodnota podle typu testovacího scénáře
disallow=all
allow=alaw
allow=ulaw
nat=yes
session-timers=refuse
localnet=192.168.1.0/255.255.255.0
call-limit=10

[pepa]
type=friend
host=dynamic
username=pepa
secret=123456
context=internal
callerid=Pepa <7001>
call-limit=10

[franta]
type=friend
host=dynamic
username=franta
secret=456789
context=internal
callerid=Franta <7002>
call-limit=10

[sipp]
type=friend
context=internal
host=dynamic
user=sipp
canreinvite=no
disallow=all
allow=alaw
allow=ulaw
call-limit=10

[1001]
type=friend
host=dynamic
username=1001
secret=123456
context=internal
callerid=1001 <1001>
call-limit=10

[1002]
type=friend
host=dynamic
username=1002
secret=123456
context=internal
callerid=1002 <1002>
call-limit=10

.
```

```
.  
.
  
[1100]
type=friend
host=dynamic
username=1100
secret=123456
context=internal
callerid=1100 <1100>
call-limit=10
```

Ukázka kódu F.8: Soubor nastavení ústředny sip.conf

Soubor extension.conf:

```
[internal]
exten => 7001,1,Answer()
exten => 7001,2,Dial(SIP/pepa,60)
exten => 7001,3,Playback(vm-nobodyavail)
exten => 7001,4,VoiceMail(pepa@main)
exten => 7001,5,Hangup()

exten => 100,1,Answer
exten => 100,n,MusicOnHold(default,20)
exten => 100,n,Hangup()

exten => 7002,1,Answer()
exten => 7002,2,Dial(SIP/franta,60)
exten => 7002,3,Playback(vm-nobodyavail)
exten => 7002,4,VoiceMail(franta@main)
exten => 7002,5,Hangup()

exten => _1XXX,1,Answer()
exten => _1XXX,n,Dial(SIP/${EXTEN},60)
exten => _1XXX,n,Playback(vm-nobodyavail)
exten => _1XXX,n,Hangup()
```

Ukázka kódu F.9: Soubor nastavení ústředny extension.conf

Testování kvality přenosu hlasu probíhalo ve třech konfiguracích nejdříve pro 50 současných hovorů, poté byl snížen počet hovorů na 30 a poslední test probíhal při počtu 25 hovorů. Výsledky ukázaly, že 25 souběžných hovorů je pravděpodobně maximální počet hovorů, které zvládne ústředna obsluhovat, aby nedocházelo ke zhoršení přenosu hlasu.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	50	93,03	93,19	93,20	93,20	93,20	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	50	36,35	84,20	93,64	92,18	93,11	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64	93,64
Caller max RFC3550 jitter (ms)	50	4,93	13,12	14,41	13,97	14,20	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41	14,41
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	50	1,87	2,95	3,99	3,26	3,30	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99	3,99
Caller SDP-RTP delay (ms)	50	18,00	39,98	100,00	57,00	62,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	50	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	50	45,60	124,03	208,64	194,15	194,29	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64	208,64
Called max RFC3550 jitter (ms)	50	8,33	14,21	18,65	18,00	18,43	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65	18,65
Called mean RFC3550 jitter (ms)	50	6,14	6,37	6,45	6,43	6,44	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45	6,45
Called SDP-RTP delay (ms)	50	-20,00	9,60	30,00	20,00	24,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
100 response delay (ms)	50	0,00	2,32	24,00	8,00	16,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Answer delay (ms)	50	14,00	48,30	342,00	78,00	88,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00	342,00
-24dB delay (ms)	50	541,14	569,40	611,65	591,44	597,23	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65	611,65
RTCP RTT (ms)	50	0,00	7,14	16,17	10,50	12,59	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17	16,17
RTCP caller lost packets (%)	50	0,00	1,65	50,24	0,00	0,04	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24
RTCP caller max jitter (ms)	50	12,24	13,43	14,53	14,08	14,41	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53
RTCP called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	50	0,00	0,31	1,75	1,00	1,50	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Media threads delay (ms)	50	6,63	28,16	77,38	51,24	66,06	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38	77,38
Signaling thread delay (ms)	50	0,00	0,01	0,10	0,00	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
GUI thread delay (ms)	50	367,03	906,91	2186,48	1514,12	1898,53	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48	2186,48

Obrázek G.1: Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,03	93,19	93,20	93,12	93,12	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	30	112,43	122,48	135,15	133,19	133,81	135,15	135,15	135,15	135,15	135,15	135,15	135,15	135,15
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	11,17	12,02	13,29	13,07	13,29	13,29	13,29	13,29	13,29	13,29	13,29	13,29	13,29
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	1,41	1,56	1,72	1,67	1,71	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	24,00	42,33	94,00	58,00	60,00	94,00	94,00	94,00	94,00	94,00	94,00	94,00	94,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	30	46,83	108,59	203,05	187,20	203,05	203,05	203,05	203,05	203,05	203,05	203,05	203,05	203,05
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	8,25	12,97	18,38	17,96	18,38	95% of calls have quality better than this value				18,38	18,38	18,38	18,38
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	6,30	6,35	6,44	6,38	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
Called SDP-RTP delay (ms)	30	-39,00	6,03	24,00	17,00	18,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
100 response delay (ms)	30	0,00	1,53	16,00	5,00	7,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
Answer delay (ms)	30	21,00	61,47	362,00	87,00	91,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00
-24dB delay (ms)	30	542,55	566,98	599,55	590,15	595,17	599,55	599,55	599,55	599,55	599,55	599,55	599,55	599,55
RTCP RTT (ms)	30	3,59	6,98	22,80	10,03	11,45	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	1,42	42,48	0,02	0,04	42,48	42,48	42,48	42,48	42,48	42,48	42,48	42,48
RTCP caller max jitter (ms)	30	11,33	12,50	13,88	13,61	13,75	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	30	0,00	0,42	1,75	1,00	1,38	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Media threads delay (ms)	30	25,60	85,65	188,80	147,02	173,75	188,80	188,80	188,80	188,80	188,80	188,80	188,80	188,80
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
GUI thread delay (ms)	30	270,46	590,97	1246,35	900,41	1218,75	1246,35	1246,35	1246,35	1246,35	1246,35	1246,35	1246,35	1246,35

Obrázek G.2: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Caller G.107 MOS	25	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	25	93,12	93,20	93,20	93,20	93,20	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12
Caller max delta (ms)	25	58,26	62,92	73,21	72,44	73,01	73,21	73,21	73,21	73,21	73,21	73,21	73,21	73,21
Caller max RFC3550 jitter (ms)	25	7,38	8,19	8,89	8,65	8,66	8,89	8,89	8,89	8,89	8,89	8,89	8,89	8,89
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	25	1,45	1,75	1,93	1,89	1,92	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93
Caller SDP-RTP delay (ms)	25	27,00	50,72	109,00	68,00	86,00	109,00	109,00	109,00	109,00	109,00	109,00	109,00	109,00
Called lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	25	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	25	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	25	97,18	105,73	112,81	112,75	112,81	112,81	112,81	112,81	112,81	112,81	112,81	112,81	112,81
Called max RFC3550 jitter (ms)	25	12,80	13,36	14,52	13,98	13,99	14,52	14,52	14,52	14,52	14,52	14,52	14,52	14,52
Called mean RFC3550 jitter (ms)	25	6,34	6,39	6,43	6,41	6,42	6,43	6,43	6,43	6,43	6,43	6,43	6,43	6,43
Called SDP-RTP delay (ms)	25	-6,00	8,16	26,00	18,00	22,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
100 response delay (ms)	25	0,00	1,56	27,00	1,00	1,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
Answer delay (ms)	25	32,00	74,00	327,00	94,00	104,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00
-24dB delay (ms)	25	549,94	568,52	601,93	587,53	590,33	601,93	601,93	601,93	601,93	601,93	601,93	601,93	601,93
RTCP RTT (ms)	25	3,16	6,05	28,50	8,58	8,72	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50
RTCP caller lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP caller max jitter (ms)	25	9,16	10,31	11,48	11,06	11,08	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48
RTCP called lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	25	0,00	0,48	2,13	1,13	1,50	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
Media threads delay (ms)	25	12,36	35,59	75,73	64,20	69,83	75,73	75,73	75,73	75,73	75,73	75,73	75,73	75,73
Signaling thread delay (ms)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GUI thread delay (ms)	25	1,67	559,46	1575,10	1251,35	1290,90	1575,10	1575,10	1575,10	1575,10	1575,10	1575,10	1575,10	1575,10

Obrázek G.3: Vyhodnocení simulace 25 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Raspbian

Z vybraných měření jsou vyobrazeny statistiky přenášených médií na obrázcích G.1, G.2, G.3, kde je patrné, že při vytíženosti 50 současnými hovory již ústředna nezvládá odesílat včas RTP pakety a dochází ke zpoždění. První výsledky, které byly s ohledem na přenos audia akceptovatelné, se pohybovaly okolo 25 současných hovorů. Tyto výsledky byly získány při měření v lokální síti na vzdálenost jednotek metrů, v případě telefonních hovorů mezi pobočkami, případně jinými lokalitami by docházelo k větším zpoždění paketů a mohlo by také dojít ke zhoršení kvality přenášeného audio signálu a tím by reálný počet současných hovorů byl ještě nižší.

Výsledky při změně operačního systému na systém Ubuntu jsou podobné, konkrétní hodnoty zpoždění se liší v nepatrných hodnotách. Opět se projevilo, že přibližný počet maximálních souběžných hovorů je okolo 25. V reálném prostředí se počet současných hovorů ještě sníží. Při důkladném otestování bylo zjištěno, že vliv operačního systému není až tak znatelný a tudíž nelze s jistotou říci, který operační systém je vhodnější a záleží na konkrétní preferované volbě správce ústředny.

Příloha G - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Raspberry Pi 2 Model B

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	50	0,00	0,01	0,07	0,02	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Caller G.107 MOS	50	4,40	4,41	4,41	4,41	4,41	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
Caller G.107 R-factor	50	92,95	93,17	93,20	93,12	93,03	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95	92,95
Caller max delta (ms)	50	43,27	51,63	79,54	61,05	61,89	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54	79,54
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	50	7,60	9,51	11,40	11,05	11,29	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40	11,40
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	50	1,44	1,56	1,68	1,63	1,64	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Caller SDP-RTP delay (ms)	50	22,00	43,92	102,00	64,00	72,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00	102,00
Called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	50	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	50	47,60	111,64	184,12	148,30	168,29	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12	184,12
Called max RFC3550 jitter (ms)	50	9,03	13,62	17,67	16,20	17,16	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67
Called mean RFC3550 jitter (ms)	50	6,33	6,37	6,44	6,41	6,43	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
Called SDP-RTP delay (ms)	50	-20,00	10,68	52,00	22,00	31,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
100 response delay (ms)	50	0,00	1,38	25,00	1,00	9,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Answer delay (ms)	50	20,00	53,94	327,00	81,00	88,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00	327,00
-24dB delay (ms)	50	541,08	570,87	624,88	588,05	593,06	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88	624,88
RTCP RTT (ms)	50	3,34	6,61	14,08	9,41	10,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08
RTCP caller lost packets (%)	50	0,00	0,78	38,48	0,04	0,04	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48
RTCP caller max jitter (ms)	50	9,46	11,20	13,23	12,77	13,07	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
RTCP called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	50	0,00	0,36	2,13	1,00	1,38	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
Media threads delay (ms)	50	11,56	60,35	127,21	102,08	113,96	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21	127,21
Signaling thread delay (ms)	50	0,00	3,30	94,89	0,00	21,93	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89	94,89
GUI thread delay (ms)	50	19,93	488,73	1316,73	864,95	1020,04	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73	1316,73

Obrázek G.4: Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,04	0,05	0,09	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Caller G.107 MOS	30	4,40	4,41	4,41	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
Caller G.107 R-factor	30	92,86	92,99	93,03	92,95	92,95	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86
Caller max delta (ms)	30	89,08	94,30	96,70	96,00	96,18	96,70	96,70	96,70	96,70	96,70	96,70	96,70	96,70
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	16,52	17,73	20,19	18,49	19,35	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	1,34	1,45	1,54	1,50	1,51	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	25,00	51,00	158,00	70,00	88,00	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	30	46,86	56,35	64,58	62,60	64,49	64,58	64,58	64,58	64,58	64,58	64,58	64,58	64,58
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	8,40	9,50	11,10	10,38	10,43	11,10	11,10	11,10	11,10	11,10	11,10	11,10	11,10
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	5,75	5,79	5,89	5,81	5,84	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89
Called SDP-RTP delay (ms)	30	-19,00	9,33	27,00	18,00	23,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
100 response delay (ms)	30	0,00	1,57	13,00	2,00	10,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
Answer delay (ms)	30	25,00	71,13	398,00	95,00	108,00	398,00	398,00	398,00	398,00	398,00	398,00	398,00	398,00
-24dB delay (ms)	30	549,66	571,28	609,07	590,65	606,06	609,07	609,07	609,07	609,07	609,07	609,07	609,07	609,07
RTCP RTT (ms)	30	2,61	4,22	7,36	6,28	7,11	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36
RTCP caller lost packets (%)	30	0,04	1,32	36,99	0,07	1,07	36,99	36,99	36,99	36,99	36,99	36,99	36,99	36,99
RTCP caller max jitter (ms)	30	16,22	17,59	19,95	18,25	19,16	19,95	19,95	19,95	19,95	19,95	19,95	19,95	19,95
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	30	0,00	0,50	2,38	1,38	1,88	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38
Media threads delay (ms)	30	7,75	16,20	30,27	25,81	28,87	30,27	30,27	30,27	30,27	30,27	30,27	30,27	30,27
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	1,64	49,28	0,00	0,00	49,28	49,28	49,28	49,28	49,28	49,28	49,28	49,28
GUI thread delay (ms)	30	2,24	136,60	620,66	442,55	487,46	620,66	620,66	620,66	620,66	620,66	620,66	620,66	620,66

Obrázek G.5: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Caller G.107 MOS	25	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	25	93,12	93,19	93,20	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12
Caller max delta (ms)	25	98,00	109,34	114,77	111,11	111,39	114,77	114,77	114,77	114,77	114,77	114,77	114,77	114,77
Caller max RFC3550 jitter (ms)	25	18,79	20,19	21,58	21,26	21,43	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	25	1,20	1,30	1,39	1,37	1,37	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
Caller SDP-RTP delay (ms)	25	27,00	47,64	111,00	63,00	68,00	111,00	111,00	111,00	111,00	111,00	111,00	111,00	111,00
Called lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	25	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	25	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	25	31,73	50,03	75,56	74,26	75,55	75,56	75,56	75,56	75,56	75,56	75,56	75,56	75,56
Called max RFC3550 jitter (ms)	25	6,89	8,69	11,23	10,92	10,94	11,23	11,23	11,23	11,23	11,23	11,23	11,23	11,23
Called mean RFC3550 jitter (ms)	25	5,95	6,20	6,30	6,29	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30
Called SDP-RTP delay (ms)	25	-20,00	7,88	28,00	20,00	21,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
100 response delay (ms)	25	0,00	1,56	19,00	1,00	7,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
Answer delay (ms)	25	35,00	70,24	314,00	87,00	96,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00
-24dB delay (ms)	25	542,96	566,89	591,79	586,58	587,98	591,79	591,79	591,79	591,79	591,79	591,79	591,79	591,79
RTCP RTT (ms)	25	0,00	3,00	6,71	3,37	3,95	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71
RTCP caller lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP caller max jitter (ms)	25	18,98	20,33	21,68	21,36	21,51	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68
RTCP called lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	25	0,00	0,51	1,25	1,13	1,13	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Media threads delay (ms)	25	4,75	20,14	39,93	35,70	39,70	39,93	39,93	39,93	39,93	39,93	39,93	39,93	39,93
Signaling thread delay (ms)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GUI thread delay (ms)	25	2,12	118,81	593,57	446,95	458,64	593,57	593,57	593,57	593,57	593,57	593,57	593,57	593,57

Obrázek G.6: Vyhodnocení simulace 25 současných hovorů Raspberry Pi 2 Model B - OS Ubuntu

Statistiky pro operační systém Ubuntu jsou na obrázcích G.4, G.5, G.6.

Simulace souběžných volání na platformě Orange Pi Pc probíhala v několika krocích. Nejdříve byla realizována měření při 30 současných volání, poté při 35 a nakonec při 45 souběžných volání. Testy ukázaly, že při překročení 30 souběžných volání již dochází ke zpoždění RTP paketů a i ke ztrátám. Jednotlivé výsledky jsou na obrázcích H.1, H.2 a H.3.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,01	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,03	93,18	93,20	93,12	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	30	70,33	86,22	100,73	92,34	96,25	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73	100,73
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	7,90	8,82	10,78	9,40	9,75	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	1,89	2,01	2,14	2,09	2,10	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	23,00	45,80	119,00	60,00	82,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00	119,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	30	34,73	44,53	62,35	52,06	52,20	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35	62,35
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	7,45	8,39	9,60	8,77	9,04	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60	9,60
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	6,26	6,29	6,33	6,31	6,32	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33
Called SDP-RTP delay (ms)	30	-19,00	6,63	19,00	16,00	16,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
100 response delay (ms)	30	0,00	0,90	7,00	1,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Answer delay (ms)	30	25,00	64,53	332,00	83,00	112,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00	332,00
-24dB delay (ms)	30	548,30	564,49	583,91	578,71	583,68	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91	583,91
RTCP RTT (ms)	30	1,83	3,26	5,32	4,46	4,84	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	0,01	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
RTCP caller max jitter (ms)	30	7,94	8,87	10,77	9,45	9,74	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	30	0,00	0,37	2,00	0,75	0,88	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Media threads delay (ms)	30	7,10	16,39	29,26	26,18	28,90	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26	29,26
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	1,64	49,14	0,00	0,08	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14
GUI thread delay (ms)	30	0,79	131,12	630,45	565,89	619,39	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45	630,45

Obrázek H.1: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Ubuntu

Příloha H - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Orange Pi Pc

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	35	0,00	0,00	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	35	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	35	93,03	93,19	93,20	93,12	93,12	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	35	87,34	95,94	107,95	105,34	106,64	107,95	107,95	107,95	107,95	107,95	107,95	107,95	107,95
Caller max RFC3550 jitter (ms)	35	10,98	12,69	14,00	13,50	13,70	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	35	2,08	2,53	3,18	3,08	3,16	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18	3,18
Caller SDP-RTP delay (ms)	35	24,00	44,60	107,00	67,00	75,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00
Called lost packets (%)	35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	35	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	35	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	35	44,43	47,19	53,74	47,86	51,65	53,74	53,74	53,74	53,74	53,74	53,74	53,74	53,74
Called max RFC3550 jitter (ms)	35	8,12	8,76	10,90	9,71	9,72	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90
Called mean RFC3550 jitter (ms)	35	6,27	6,30	6,32	6,31	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Called SDP-RTP delay (ms)	35	-53,00	6,71	24,00	15,00	18,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
100 response delay (ms)	35	0,00	1,06	14,00	1,00	10,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Answer delay (ms)	35	26,00	61,83	371,00	90,00	95,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00
-24dB delay (ms)	35	546,62	565,59	589,99	581,17	585,58	589,99	589,99	589,99	589,99	589,99	589,99	589,99	589,99
RTCP RTT (ms)	35	1,97	3,80	5,66	5,57	5,62	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66
RTCP caller lost packets (%)	35	0,00	1,86	64,79	0,02	0,04	64,79	64,79	64,79	64,79	64,79	64,79	64,79	64,79
RTCP caller max jitter (ms)	35	11,00	12,75	13,98	13,48	13,81	13,98	13,98	13,98	13,98	13,98	13,98	13,98	13,98
RTCP called lost packets (%)	35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	35	0,00	0,36	1,88	0,88	1,25	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
Media threads delay (ms)	35	12,24	27,55	64,23	51,38	57,55	64,23	64,23	64,23	64,23	64,23	64,23	64,23	64,23
Signaling thread delay (ms)	35	0,00	1,78	62,40	0,00	0,00	62,40	62,40	62,40	62,40	62,40	62,40	62,40	62,40
GUI thread delay (ms)	35	2,05	96,63	617,69	393,88	596,47	617,69	617,69	617,69	617,69	617,69	617,69	617,69	617,69

Obrázek H.2: Vyhodnocení simulace 35 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Ubuntu

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	45	0,00	0,00	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caller G.107 MOS	45	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	45	93,03	93,18	93,20	93,12	93,12	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Caller max delta (ms)	45	50,05	61,89	72,33	69,92	69,93	72,33	72,33	72,33	72,33	72,33	72,33	72,33	72,33
Caller max RFC3550 jitter (ms)	45	6,01	7,60	9,17	8,73	8,79	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	45	1,59	1,81	1,96	1,92	1,93	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
Caller SDP-RTP delay (ms)	45	20,00	48,27	97,00	68,00	73,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00
Called lost packets (%)	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	45	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	45	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	45	37,26	54,39	71,36	63,71	63,82	71,36	71,36	71,36	71,36	71,36	71,36	71,36	71,36
Called max RFC3550 jitter (ms)	45	7,92	9,20	10,51	9,88	9,92	10,51	10,51	10,51	10,51	10,51	10,51	10,51	10,51
Called mean RFC3550 jitter (ms)	45	6,25	6,29	6,32	6,31	6,31	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Called SDP-RTP delay (ms)	45	-49,00	8,27	40,00	23,00	25,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
100 response delay (ms)	45	0,00	0,47	3,00	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Answer delay (ms)	45	11,00	56,53	371,00	89,00	91,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00	371,00
-24dB delay (ms)	45	542,80	560,10	578,55	572,18	576,94	578,55	578,55	578,55	578,55	578,55	578,55	578,55	578,55
RTCP RTT (ms)	45	0,00	3,68	7,05	5,05	5,51	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05
RTCP caller lost packets (%)	45	0,00	0,41	11,18	0,02	0,04	11,18	11,18	11,18	11,18	11,18	11,18	11,18	11,18
RTCP caller max jitter (ms)	45	6,36	7,70	9,23	8,70	8,84	9,23	9,23	9,23	9,23	9,23	9,23	9,23	9,23
RTCP called lost packets (%)	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	45	0,00	0,35	1,75	0,88	1,00	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Media threads delay (ms)	45	5,35	13,00	29,41	23,56	26,32	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41
Signaling thread delay (ms)	45	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
GUI thread delay (ms)	45	2,11	154,81	679,85	588,71	618,96	679,85	679,85	679,85	679,85	679,85	679,85	679,85	679,85

Obrázek H.3: Vyhodnocení simulace 45 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Ubuntu

Při simulaci s operačním systémem Debian bylo dosaženo podobných výsledků, a to tedy maximálního počtu 30 souběžných volání. při snížení počtu volání na 25 dochází

ke zkvalitnění přenášeného audio signálu a tím k lepší kvalitě hovoru. Pokud bychom chtěli navrhnout ústřednu s využitím vestavěného systému Orange Pi Pc mohli bychom se spolehnout na bezproblémový chod při zatížení do 25 současných volání. Jednotlivé statistiky jsou vyobrazeny na následujících obrázcích H.4, H.5, H.6. Na příloženém CD je záznam pro jednotlivá volání z programu SIP tester pro variantu s 45 současnými hovory.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	25	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	25	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	25	22,57	28,57	57,46	37,66	53,23	57,46	57,46	57,46	57,46	57,46	57,46	57,46	57,46
Caller max RFC3550 jitter (ms)	25	0,73	1,37	4,73	2,43	4,09	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	25	0,21	0,29	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Caller SDP-RTP delay (ms)	25	11,00	21,00	49,00	24,00	42,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00
Called lost packets (%)	25	0,00	0,01	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Called G.107 MOS	25	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	25	93,03	93,17	93,20	93,12	93,12	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Called max delta (ms)	25	38,44	45,34	56,53	47,74	49,54	56,53	56,53	56,53	56,53	56,53	56,53	56,53	56,53
Called max RFC3550 jitter (ms)	25	7,42	8,28	9,32	8,95	9,00	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32
Called mean RFC3550 jitter (ms)	25	6,24	6,30	6,35	6,34	6,34	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Called SDP-RTP delay (ms)	25	69,00	111,84	357,00	137,00	145,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00
100 response delay (ms)	25	6,00	7,64	11,00	9,00	9,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
Answer delay (ms)	25	9,00	10,28	14,00	12,00	12,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
-24dB delay (ms)	25	238,25	312,43	832,55	366,39	371,68	832,55	832,55	832,55	832,55	832,55	832,55	832,55	832,55
RTCP RTT (ms)	25	1,56	2,63	5,63	3,80	5,45	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63
RTCP caller lost packets (%)	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP caller max jitter (ms)	25	0,00	0,02	0,38	0,00	0,00	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
RTCP called lost packets (%)	25	0,00	0,01	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
RTCP called max jitter (ms)	25	7,93	8,40	9,29	8,94	8,94	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29
Media threads delay (ms)	25	1,94	3,00	5,65	4,86	5,29	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65
Signaling thread delay (ms)	25	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
GUI thread delay (ms)	25	5,38	108,21	527,81	390,50	512,15	527,81	527,81	527,81	527,81	527,81	527,81	527,81	527,81

Obrázek H.4: Vyhodnocení simulace 25 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Debian

Příloha H - Výsledky simulace hovorů s přenosem RTP - Orange Pi Pc

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	30	56,43	65,76	71,05	70,83	70,99	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05	71,05
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	4,21	5,11	5,75	5,68	5,69	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	0,17	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	11,00	17,57	27,00	22,00	23,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,03	93,19	93,20	93,20	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03	93,03
Called max delta (ms)	30	92,59	114,76	127,02	126,30	126,53	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02	127,02
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	15,25	16,72	18,82	17,92	18,06	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82	18,82
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	8,40	8,57	8,76	8,72	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76
Called SDP-RTP delay (ms)	30	84,00	127,03	372,00	148,00	180,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00
100 response delay (ms)	30	11,00	42,33	91,00	64,00	77,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00
Answer delay (ms)	30	14,00	44,30	91,00	66,00	77,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00	91,00
-24dB delay (ms)	30	283,01	381,82	898,94	454,10	520,88	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94	898,94
RTCP RTT (ms)	30	25,89	46,32	74,19	72,00	74,00	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19	74,19
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP caller max jitter (ms)	30	0,00	1,42	4,25	2,63	4,13	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
RTCP called max jitter (ms)	30	15,26	16,74	18,92	17,92	18,07	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92	18,92
Media threads delay (ms)	30	2,95	13,62	37,08	28,67	34,05	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08	37,08
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
GUI thread delay (ms)	30	0,43	120,28	536,87	453,73	536,56	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87	536,87

Obrázek H.5: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Debian

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	45	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	45	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	45	101,26	113,83	122,20	121,48	121,49	122,20	122,20	122,20	122,20	122,20	122,20	122,20	122,20
Caller max RFC3550 jitter (ms)	45	8,65	9,63	10,37	10,35	10,36	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	45	0,30	0,39	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Caller SDP-RTP delay (ms)	45	12,00	19,38	69,00	23,00	30,00	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00
Called lost packets (%)	45	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Called G.107 MOS	45	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	45	93,12	93,19	93,20	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12	93,12
Called max delta (ms)	45	92,32	94,10	99,19	95,22	95,35	99,19	99,19	99,19	99,19	99,19	99,19	99,19	99,19
Called max RFC3550 jitter (ms)	45	11,56	12,28	12,96	12,69	12,80	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96	12,96
Called mean RFC3550 jitter (ms)	45	6,16	6,28	6,42	6,35	6,37	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42
Called SDP-RTP delay (ms)	45	61,00	98,20	443,00	117,00	142,00	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00
100 response delay (ms)	45	6,00	9,29	16,00	12,00	15,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
Answer delay (ms)	45	9,00	12,07	24,00	15,00	18,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
-24dB delay (ms)	45	223,18	288,74	1008,86	325,90	342,95	1008,86	1008,86	1008,86	1008,86	1008,86	1008,86	1008,86	1008,86
RTCP RTT (ms)	45	1,77	3,39	7,48	5,20	6,52	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48
RTCP caller lost packets (%)	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP caller max jitter (ms)	45	0,00	0,13	3,88	0,13	0,38	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88
RTCP called lost packets (%)	45	0,00	4,84	65,09	0,02	58,18	65,09	65,09	65,09	65,09	65,09	65,09	65,09	65,09
RTCP called max jitter (ms)	45	11,55	12,30	13,05	12,68	12,79	13,05	13,05	13,05	13,05	13,05	13,05	13,05	13,05
Media threads delay (ms)	45	2,44	22,33	78,56	58,71	68,08	78,56	78,56	78,56	78,56	78,56	78,56	78,56	78,56
Signaling thread delay (ms)	45	0,00	0,01	0,12	0,02	0,02	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
GUI thread delay (ms)	45	0,26	62,39	320,24	191,17	246,16	320,24	320,24	320,24	320,24	320,24	320,24	320,24	320,24

Obrázek H.6: Vyhodnocení simulace 45 současných hovorů Orange Pi Pc - OS Debian

Kvalita simulovaných hovorů je nejdůležitější částí pro volající. Při velkém zpoždění dochází ke zhoršení poslechové kvality pro volající. Pro 15, 30 a 45 současných volání jsou výsledky na obrazcích I.1, I.2 a I.3. Při 50 volání již ústředna nezvládá včas přeposílat RTP pakety a dochází k velkým zpoždění. Výrobce udává jako maximální počet souběžných volání 30, což dle naměřených výsledků ústředna zvládne.

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	15	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	15	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	15	22,83	29,21	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33	32,33
Caller max RFC3550 jitter (ms)	15	0,76	1,70	2,34	2,33	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	15	0,22	0,27	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Caller SDP-RTP delay (ms)	15	17,00	22,87	42,00	32,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00
Called lost packets (%)	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Called G.107 MOS	15	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	15	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Called max delta (ms)	15	120,10	136,12	160,01	140,27	160,01	160,01	160,01	160,01	160,01	160,01	160,01	160,01	160,01
Called max RFC3550 jitter (ms)	15	16,63	18,29	19,11	19,03	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11	19,11
Called mean RFC3550 jitter (ms)	15	1,85	2,23	2,81	2,79	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81
Called SDP-RTP delay (ms)	15	102,00	174,47	201,00	200,00	201,00	201,00	201,00	201,00	201,00	201,00	201,00	201,00	201,00
100 response delay (ms)	15	12,00	16,73	24,00	23,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Answer delay (ms)	15	213,00	255,73	544,00	291,00	544,00	544,00	544,00	544,00	544,00	544,00	544,00	544,00	544,00
-24dB delay (ms)	15	636,25	698,58	1002,47	719,65	1002,47	1002,47	1002,47	1002,47	1002,47	1002,47	1002,47	1002,47	1002,47
RTCP RTT (ms)	15	24,51	38,40	49,03	48,69	49,03	49,03	49,03	49,03	49,03	49,03	49,03	49,03	49,03
RTCP caller lost packets (%)	15	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP caller max jitter (ms)	15	17,00	18,93	23,00	21,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
RTCP called lost packets (%)	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RTCP called max jitter (ms)	15	16,60	18,46	19,52	19,35	19,52	19,52	19,52	19,52	19,52	19,52	19,52	19,52	19,52
Media threads delay (ms)	15	2,64	4,09	5,98	5,89	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98
Signaling thread delay (ms)	15	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
GUI thread delay (ms)	15	0,64	98,09	395,57	312,10	395,57	395,57	395,57	395,57	395,57	395,57	395,57	395,57	395,57

Obrázek I.1: Vyhodnocení simulace 15 současných hovorů Grandstream UCM 6102

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	30	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	30	22,54	51,90	94,29	89,42	91,96	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29	94,29
Caller max RFC3550 jitter (ms)	30	0,74	3,85	8,25	7,58	7,86	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	30	0,31	0,38	0,45	0,42	0,43	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Caller SDP-RTP delay (ms)	30	14,00	20,10	38,00	24,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Called G.107 MOS	30	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	30	93,11	93,19	93,20	93,20	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11	93,11
Called max delta (ms)	30	120,10	136,32	179,32	140,65	159,74	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32	179,32
Called max RFC3550 jitter (ms)	30	17,01	18,79	21,58	19,70	21,30	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58	21,58
Called mean RFC3550 jitter (ms)	30	1,96	2,18	2,79	2,54	2,75	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79
Called SDP-RTP delay (ms)	30	140,00	185,53	203,00	198,00	200,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00
100 response delay (ms)	30	11,00	30,37	95,00	68,00	72,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
Answer delay (ms)	30	175,00	342,30	820,00	564,00	652,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00	820,00
-24dB delay (ms)	30	634,08	790,17	1229,33	998,18	1071,87	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33	1229,33
RTCP RTT (ms)	30	36,00	49,67	70,00	59,79	66,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
RTCP caller lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP caller max jitter (ms)	30	17,00	19,50	22,00	21,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
RTCP called lost packets (%)	30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP called max jitter (ms)	30	17,33	18,93	21,61	20,03	21,34	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61	21,61
Media threads delay (ms)	30	2,05	6,90	15,57	13,30	15,38	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57	15,57
Signaling thread delay (ms)	30	0,00	0,01	0,05	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
GUI thread delay (ms)	30	0,73	77,90	620,00	176,84	378,30	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00	620,00

Obrázek I.2: Vyhodnocení simulace 30 současných hovorů Grandstream UCM 6102

Indicator	Ncalls	Min	Average	Max	Percentile 90%	95%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%	99.95%	99.98%	99.99%
Caller lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caller G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Caller G.107 R-factor	50	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
Caller max delta (ms)	50	23,27	30,65	76,70	39,38	63,47	76,70	76,70	76,70	76,70	76,70	76,70	76,70	76,70
Caller max RFC3550 jitter (ms)	50	0,76	1,62	6,71	2,54	4,88	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71
Caller mean RFC3550 jitter (ms)	50	0,25	0,38	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Caller SDP-RTP delay (ms)	50	12,00	19,08	44,00	23,00	28,00	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00
Called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Called G.107 MOS	50	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41
Called G.107 R-factor	50	93,09	93,19	93,20	93,20	93,09	93,09	93,09	93,09	93,09	93,09	93,09	93,09	93,09
Called max delta (ms)	50	149,88	207,91	484,15	256,99	342,56	484,15	484,15	484,15	484,15	484,15	484,15	484,15	484,15
Called max RFC3550 jitter (ms)	50	24,57	31,73	49,80	37,82	40,65	49,80	49,80	49,80	49,80	49,80	49,80	49,80	49,80
Called mean RFC3550 jitter (ms)	50	3,43	7,43	9,22	8,37	9,00	9,22	9,22	9,22	9,22	9,22	9,22	9,22	9,22
Called SDP-RTP delay (ms)	50	0,00	145,04	362,00	198,00	261,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00	362,00
100 response delay (ms)	50	12,00	397,44	3709,00	1089,00	2820,00	3709,00	3709,00	3709,00	3709,00	3709,00	3709,00	3709,00	3709,00
Answer delay (ms)	50	191,00	2453,99	8810,00	7945,00	8298,79	8810,00	8810,00	8810,00	8810,00	8810,00	8810,00	8810,00	8810,00
-24dB delay (ms)	50	612,38	2847,40	9440,45	8384,50	8704,53	9440,45	9440,45	9440,45	9440,45	9440,45	9440,45	9440,45	9440,45
RTCP RTT (ms)	50	46,16	75,78	107,00	90,00	94,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00	107,00
RTCP caller lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
RTCP caller max jitter (ms)	50	22,00	29,44	42,00	35,00	37,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00
RTCP called lost packets (%)	50	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
RTCP called max jitter (ms)	50	24,34	30,27	39,00	35,00	37,00	39,00	39,00	39,00	39,00	39,00	39,00	39,00	39,00
Media threads delay (ms)	50	2,58	13,56	53,13	36,47	45,82	53,13	53,13	53,13	53,13	53,13	53,13	53,13	53,13
Signaling thread delay (ms)	50	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
GUI thread delay (ms)	50	0,34	59,22	487,79	105,32	181,61	487,79	487,79	487,79	487,79	487,79	487,79	487,79	487,79

Obrázek I.3: Vyhodnocení simulace 50 současných hovorů Grandstream UCM 6102

Součástí této diplomové práce je přiložené CD, na kterém je celý obsah této práce včetně získaných naměřených výsledků, testovacích scénářů a konfiguračních souborů. Soubory na přiloženém CD mají následující strukturu:

- složka **textprace** - v této složce se nachází *PDF* verze této práce, veškeré použité obrázky a zdrojové kódy pro formát *LaTeX*
- složka **sipp** - zde jsou uloženy veškeré potřebné testovací scénáře programu SIPp, konfigurační soubory *CSV* a přehrávaný audio stream
- složka **asterconf** - složka obsahuje konfigurační soubory pro softwarovou ústřednu Asterisk
- složka **vysledky** - složka obsahující jednotlivé podsložky s názvy jednotlivých ve-
stavěných systémů a typů simulace, například pro Orange Pi Pc a simulaci hovorů
s RTP přenosem s OS Ubuntu má název **opi_invite_ubuntu**, v jednotlivých
podsložkách jsou získané výsledky ze simulačních programů a u vybraných měření
je soubor *pcap* se zachycenými pakety ze strany UAS